

BOGDAN VIOREL NEAMȚU

NOȚIUNI DE CONTROL NEDISTRUCTIV



UTPRESS

Cluj-Napoca, 2019

ISBN 978-606-737-378-3

Prefață

Controlul nedistructiv cuprinde un set de metode și tehnici care permit evaluarea integrității structurale a semifabricatelor, pieselor sau dispozitivelor, fără a afecta funcționalitatea sau utilitatea acestora. Controlul nedistructiv este o parte integrantă a tuturor etapelor procesului de producție a pieselor și echipamentelor, având ca principale obiective asigurarea fiabilității produselor, evitarea defecțiunilor, prevenirea accidentelor și, bineînțeles, creșterea profitului. Totodată, tehnicile de control nedistructiv sunt utilizate și în cadrul controalelor periodice a diferitelor piese sau echipamente aflate în exploatare, pentru evaluarea integrității structurale a acestora și a gradului de siguranță în exploatare.

Cu toate că implementarea uneia sau mai multor tehnici de control nedistructiv în procesul de producție este o operație costisitoare, care va conduce la creșterea costului de producție, creșterea profitului se explică pe baza așa numitului profit netangibil. Un produs care funcționează fără a avea defecțiuni o perioadă rezonabilă de timp, va conduce la creșterea satisfacției clientului și, totodată, la creșterea sau menținerea prestigiului producătorului. Acestea vor induce ideea că respectiva companie produce echipamente fiabile/de calitate, cumpărătorul având tendința de a achiziționa pe viitor produsele acelei companii.

Lucrarea de față, fără a avea pretenția de a fi o lucrare exhaustivă, se adresează, în general, studenților din învățământul tehnic care doresc să ia un prim contact cu tehnicile de control nedistructiv. Obiectivul acestei lucrări este de a prezenta principiile fizice care stau la baza celor mai cunoscute și utilizate tehnici de control nedistructiv. Astfel, sunt tratate următoarele tehnici: controlul vizual, controlul cu lichide penetrante, controlul cu pulberi magnetice, controlul cu curenți turbionari, controlul cu ultrasunete și controlul cu radiații penetrante. Fiecare capitol se încheie cu o bibliografie relativ bogată și relevantă pentru subiectul abordat care să permită cititorului un studiu mult mai aprofundat al subiectelor de interes.

Autorul

CUPRINS

Capitolul 1. Inspecția vizuală.....	5
1.1 Introducere.....	6
1.2 Principiul de bază a controlului vizual.....	6
1.3 Controlul optico-vizual.....	7
1.4 Avantajele și dezavantajele inspecției vizuale.....	12
1.5 Bibliografie.....	12
Capitolul 2. Controlul nedistructiv cu lichide penetrante.....	13
2.1 Introducere.....	14
2.2 Bazele fizice ale controlului cu lichide penetrante.....	15
2.3 Principiul testării cu lichide penetrante.....	17
2.3.1 Pregătirea suprafeței probei.....	18
2.3.2 Aplicarea lichidului penetrant.....	19
2.3.3 Îndepărtarea surplusului de lichid penetrant.....	20
2.3.4 Aplicarea developantului.....	20
2.3.5 Examinarea vizuala și interpretarea rezultatelor.....	21
2.4 Tipuri de penetranți și developanți folosiți în controlul nedistructiv cu lichide penetrante..	23
2.4.1 Penetranți.....	23
2.4.2 Developanți.....	25
2.5 Avantajele și dezavantajele controlului nedistructiv cu lichide penetrante.	27
2.6 Sensibilitatea examinării cu lichide penetrante.....	28
2.7 Controlul nedistructiv cu penetranți gazoși.....	31
2.8 Bibliografie.....	32
Capitolul 3. Controlul nedistructiv cu pulberi magnetice.....	34
3.1 Introducere.....	35
3.2 Noțiuni introductive de magnetism tehnic.....	35
3.3 Curba de histerezis magnetic și mărimi ce se determina de pe aceasta.....	38
3.4 Principiul de bază a controlului nedistructiv cu pulberi magnetice.....	40
3.5 Pregătirea suprafeței pentru examinare.....	43
3.6 Metode de magnetizare a pieselor pentru controlului cu pulberi magnetice	43
3.6.1 Metode de magnetizare longitudinală sau polară.....	45
3.6.2 Metode de magnetizare transversală sau circulară.....	46
3.7 Alegerea tipului curentului electric care produce câmpul magnetizant.....	49
3.7.1 Curentul continuu.....	49
3.7.2 Curentul alternativ.....	49
3.7.3 Curentul pulsatoriu.....	50
3.8 Distribuția câmpului magnetic în piese.....	50
3.9 Pulberi și suspensii magnetice.....	53
3.10 Metode de control cu pulberi magnetice.....	54
3.10.1 Metoda cu pulberi uscate.....	54
3.10.2 Metoda umeda (cu pulberi în suspensie).....	55
3.11 Analiza și interpretarea indicațiilor.....	58
3.12 Demagnetizarea pieselor.....	58

3.13	Avantajele și dezavantajele controlului cu pulberi magnetice.....	60
3.14	Bibliografie.....	61
Capitolul 4. Controlul nedistructiv cu curenți turbionari.....		63
4.1	Introducere.....	64
4.2	Principiul fizic care stă la baza defectoscopiei cu curenți turbionari.....	65
4.3	Caracteristicile curenților turbionari.....	69
4.4	Factori care influențează examinarea cu curenți turbionari.....	74
4.4.1	Conductivitatea electrica a materialului examinat.....	74
4.4.2	Permeabilitatea magnetica a materialului.....	74
4.4.3	Frecvența curentului din bobina de excitație.....	75
4.4.4	Designul senzorului.....	77
4.4.5	Distanța piesa-senzor (Lift-off).....	78
4.5	Tipuri de senzori pentru control nedistructiv cu curenți turbionari.....	79
4.5.1	Senzorii absoluți.....	80
4.5.2	Senzorii diferențiali.....	80
4.5.3	Senzori de trecere.....	81
4.5.4	Senzori interni.....	82
4.5.5	Senzori aplicați.....	83
4.6	Diagrama impedanței pentru un material neferomagnetic și feromagnetic.	83
4.6.1	Cazul materialului neferomagnetic.....	84
4.6.2	Cazul materialului feromagnetic.....	86
4.7	Avantajele și dezavantajele controlului nedistructiv cu curenți turbionari..	87
4.8	Bibliografie.....	88
Capitolul 5. Controlul nedistructiv cu ultrasunete.....		89
5.1	Introducere.....	90
5.2	Oscilații și unde elastice.....	91
5.3	Fenomene și mărimi specifice propagării undelor prin medii elastice.....	94
5.3.1	Interferența undelor.....	94
5.3.2	Viteza de propagare a undelor sonore.....	96
5.3.3	Atenuarea ultrasunetelor.....	97
5.3.4	Impedanța acustică.....	98
5.4	Reflexia și transmisia undelor sonore.....	99
5.4.1	Incidența normală.....	99
5.4.2	Incidența oblică.....	102
5.5	Generarea ultrasunetelor.....	103
5.6	Traductori de ultrasunete.....	105
5.6.1	Tipuri de traductori/palpatoare.....	108
5.6.1.1	Traductori de contact.....	108
5.6.1.2	Traductor cu cristal dublu.....	109
5.6.1.3	Traductori cu linie de întârziere.....	110
5.6.1.4	Traductori unghiulari.....	110
5.6.1.5	Traductori de imersie.....	111
5.6.1.6	Traductori phased array.....	111

5.7	Cuplantul.....	113
5.8	Examinarea cu metoda impulsului reflectat (puls-ecou).....	114
5.9	Moduri de prezentare a datelor.....	115
5.9.1	Prezentarea de tip A.....	115
5.9.2	Prezentarea de tip B.....	116
5.9.3	Prezentarea de tip C.....	117
5.10	Calibrarea echipamentelor de control cu ultrasunete.....	118
5.11	Determinarea poziției unui defect.....	121
5.12	Avantajele și dezavantajele controlului nedistructiv cu ultrasunete.....	124
5.13	Bibliografie.....	125
Capitolul 6. Controlul nedistructiv cu radiații penetrante.....		126
6.1	Introducere.....	127
6.2	Principiul de bază a controlului nedistructiv cu radiații penetrante.....	128
6.3	Radiații electromagnetice.....	129
6.4	Producerea razelor X.....	131
6.5	Generarea razelor gama.....	135
6.6	Interacțiunea radiațiilor penetrante cu materia.....	138
6.7	Interacțiunea radiației cu filmul radiografic.....	144
6.8	Factori care influențează calitatea unui control cu radiații penetrante.....	146
6.8.1	Contrastul subiectului.....	147
6.8.2	Radiația împrăștiată.....	148
6.8.3	Contrastul filmului.....	149
6.8.4	Tipul filmului radiografic.....	150
6.8.5	Procesul de developare a filmului radiografic.....	151
6.8.6	Densitatea de înnegrire.....	151
6.8.7	Ecrane intensificatoare.....	153
6.8.7.1	Ecrane metalice.....	153
6.8.7.2	Ecrane fluorescente.....	154
6.8.7.3	Ecrane compozite.....	155
6.8.8	Factori geometrici.....	155
6.8.1	Dimensiunea sursei, distanța sursă-obiect și obiect-film... ..	155
6.8.9	Forma, dimensiunea și orientarea defectului.....	157
6.9	Indicatori de calitate a imaginii radiografice.....	158
6.10	Considerații generale privind examinarea îmbinărilor sudate.....	160
6.11	Radiografia digitală.....	162
6.12	Avantajele și dezavantajele examinării cu radiații penetrante.....	164
6.13	Defectoscopie cu raze X vs. Defectoscopie cu raze gama.....	164
6.14	Bibliografie.....	165
Anexa 1. Radiografiile ale unor îmbinări sudate și piese obținute prin turnare.....		166
Anexa 2. Lista standardelor internaționale din domeniul controlului nedistructiv.....		171

Capitolul 1

Inspecția vizuală



1.1 Introducere

Cu toate că examinarea vizuală a fost prima tehnică de control nedistructiv folosită de către om, aceasta a fost neglijată pentru o foarte mare perioadă de timp. Dintre toate tehnicile de control nedistructiv, controlul vizual a fost ultimul (în ordine cronologică) care s-a impus ca tehnică de sine stătătoare. Acest lucru s-a întâmplat la începutul anilor 1980 ca urmare a dezvoltării de către Electric Power Research Institute (SUAR) a unui program de formare (instruire) de 120 de ore în domeniul inspecției vizuale [1].

Controlul vizual este, de departe, cea mai utilizată tehnică de control nedistructiv, fiind parte integrantă din marea majoritate a celorlalte tehnici de control nedistructiv. De exemplu, în cazul controlului cu lichide penetrante, după aplicarea developantului operatorul examinează vizual suprafața supusă controlului pentru a observa eventualele indicații date de defecte.

Acest tip de control nedistructiv presupune o pregătire prealabilă temeinică a operatorului, rezultatele controlului putând fi puternic influențate de cunoștințele teoretice și practice ale acestuia. De exemplu, ar fi greșit să îi cerem unui operator să investigheze prezența sau nu a retasurii la o piesă turnată dacă el nu a fost învățat în prealabil ce este retasura și cum arată. Așadar, componenta cognitivă nu trebuie neglijată din moment ce observațiile celui care realizează inspecția vizuală și concluziile inspecției sunt corelate cu informațiile deținute de inspector, cu descrieri sau diagrame prezentate în literatură. De asemenea, diminuarea funcțiilor vizuale ale operatorului, odată cu înaintarea în vârstă, sau deteriorarea stării fizice poate avea o influență negativă asupra calității controlului.

1.2 Principiul de bază al controlului vizual

În literatură, inspecția vizuală se referă nu doar la informațiile obținute vizual, dar și la cele obținute cu ajutorul altor simțuri. O definiție a acestui tip de control nedistructiv ar putea fi următoarea: *Inspeția vizuală este procesul de examinare și evaluare a sistemelor și componentelor folosind sistemul senzorial uman: văz, auz, miros, pipăit [2]*. Acest tip de control, în condițiile în care obiectul examinat este iluminat optim, permite detectarea cu ochiul liber a numeroase tipuri de defecte de suprafață, de formă, poziție reciprocă etc., cum ar fi: fisuri, pori, retasuri, incluziuni de suprafață, stropi, scurgeri, deteriorări accidentale, etc. În figura 1 este prezentată schema de principiu a examinării vizuale.

Fenomenul fizic care stă la baza examinării vizuale este reflexia luminii de pe suprafața supusă examinării. În vederea executării unui control vizual corect, accesul la suprafața examinată trebuie să fie suficient pentru amplasarea ochiului la o distanță de cel mult 600 mm (recomandat 300 mm) de suprafața de examinat și la un unghi nu mai mic de aproximativ 30°. Examinarea suprafețelor la unghiuri mai mici poate fi viciată de prezența unor umbre care să mascheze prezența unor defecte. Acuitatea vizuală a operatorului (a celui ce realizează controlul) este o caracteristică extrem de importantă. Ea reprezintă capacitatea ochiului de a remarca detaliile cele mai mici sau de a le diferenția forma. În condiții optime de iluminare, ochiul normal are o acuitate vizuală de 1 minut de arc (1/60 dintr-un grad). Acuitatea vizuală medie este de 2 - 4'. Se consideră că acuitatea vizuală a unui om este în limite normale (cu sau fără ochelari), dacă distinge defecte de tip fisuri cu deschideri de 0,07...0,15 mm, de la o

distanță de 250 de mm și în condițiile unei iluminări corespunzătoare. Distanța de la care se examinează suprafața are o influență deosebită asupra acuității vizuale. În general, focalizarea ochiului uman este optimă pentru distanțe mai mari de 250 mm. Din acest motiv, distanța recomandată dintre ochi și suprafața examinată trebuie să fie 250 – 600 mm [1].

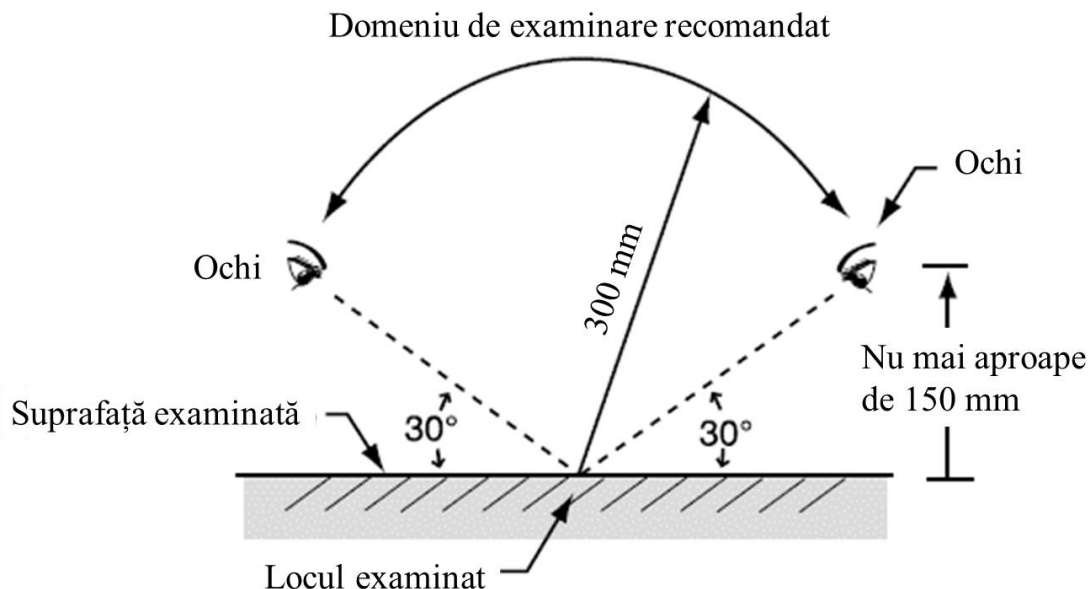


Figura 1. Schema de principiu a examinării vizuale [1].

În ceea ce privește condițiile de iluminare, normele actuale impun o iluminare de 500 – 1000 lx. Pentru a atinge 500 lx pe suprafața de examinat avem nevoie de un bec cu filament de 100 W situat la o distanță de 460 mm, un bec cu filament de 75 W situat la 380 mm sau un tub fluorescent de 80 W situat la o distanță de 1000 mm [3].

Suprafața supusă controlului trebuie să fie curățată, să nu fie acoperită cu praf, vopsea, lacuri de protecție, uleiuri, etc, deoarece acestea ar putea masca prezența defectelor.

1.3 Controlul optico-vizual

Controlul optico-vizual este un tip de control vizual care se realizează cu ajutorul unor instrumente sau aparate optice ce asigură o sensibilitate mai mare a examinării, adică posibilitatea de a detecta defecte mai fine decât cele detectabile vizual (cu ochiul liber). Instrumentele optice folosite în acest scop sunt: oglinzi, lupe, microscopie, endoscoape, boroscoape, periscope, binocluri, telescoape, etc. Aceste instrumente optice pot avea diverse puteri de mărire, în mod obișnuit nedepășind 40 X.

Lupa este cel mai simplu instrument folosit la examinarea optico-vizuală. Lupele au puteri de mărire cuprinse în intervalul 1,5 - 10 X. În general, lupa este formată dintr-o singură lentilă de formă biconvexă.

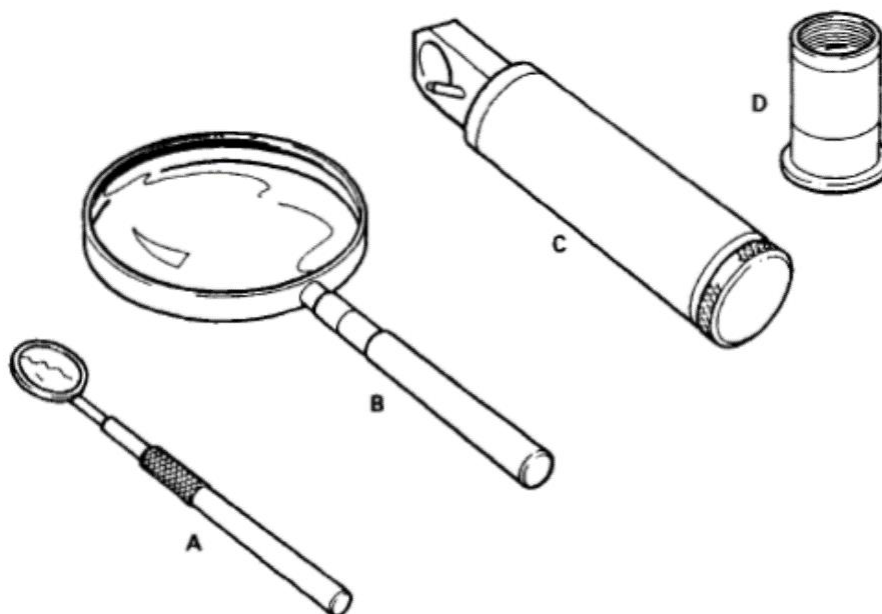


Figura 2. Instrumente ajutătoare pentru controlul optico-vizual. a – oglindă, b – lupă, c – lupă cu sistem de iluminare, d – lupa cu scală gradată. [4].

Principalele caracteristici ce trebuie cunoscute în momentul în care se alege o lupă sunt: puterea de mărire, distanța de lucru, câmpul de lucru, corecția cromatică și puterea de rezoluție. Trebuie ținut cont de faptul că aceste mărimi sunt interconectate. Astfel, o lupă cu putere de mărire mare va avea o distanță de lucru mică și un câmp vizual mic. Există lupe care au gravată pe una dintre fețe o scală gradată, cu ajutorul căreia se pot măsura eventualele defecte observate pe suprafața examinată. De asemenea, suprafața examinată poate fi iluminată cu ajutorul unei surse de lumină incorporată în suportul lentilei.

Microscopul optic sunt echipamente utilizate adesea în cadrul examinării optico-vizuale. În funcție de mărirea ce o asigură, microscopul se clasifică în microscopul cu putere de mărire mică (până la 40 X), cu putere de mărire medie (20 – 100 X) și cu putere mare de mărire (50 – 2000 X) [5].

Boroscopul este un echipament destinat inspecției interiorului tuburilor, țevilor sau suprafețelor greu accesibile. Utilizarea inițială a acestor echipamente a vizat inspecția țevilor de tun. În figura 3 este prezentată imaginea unui boroscop precum și principalele lui părți componente. Aria examinată cu ajutorul acestui echipament este de aproximativ 25 mm în diametru, distanța dintre lentila ocular și suprafața examinată fiind de aproximativ 25 mm. Iluminarea zonei examinate se realizează cu ajutorul unui cablu de fibră optică incorporat în boroscop. În general, puterea de mărire a boroscoapelor nu depășește 20 X. Din punct de vedere al dimensiunii, există o multitudine de tipuri de boroscoape, diametrul acestora variind de la 19 mm până la 1,75 mm iar lungimea variind de la zeci de centimetri la câțiva metri.

Dacă în cazul boroscoapelor de diametre mai mari imaginea suprafeței, captată de către lentila obiectiv, este transferată la ocular prin intermediul unui set de lentile (lentile releu), în cazul boroscoapelor de diametre foarte mici, lentilele sunt înlocuite cu fibră optică. Boroscoapele pot avea diferite direcții de examinare, cele mai întâlnite fiind: 0 °, 45 °, 90 °, și 110 °.

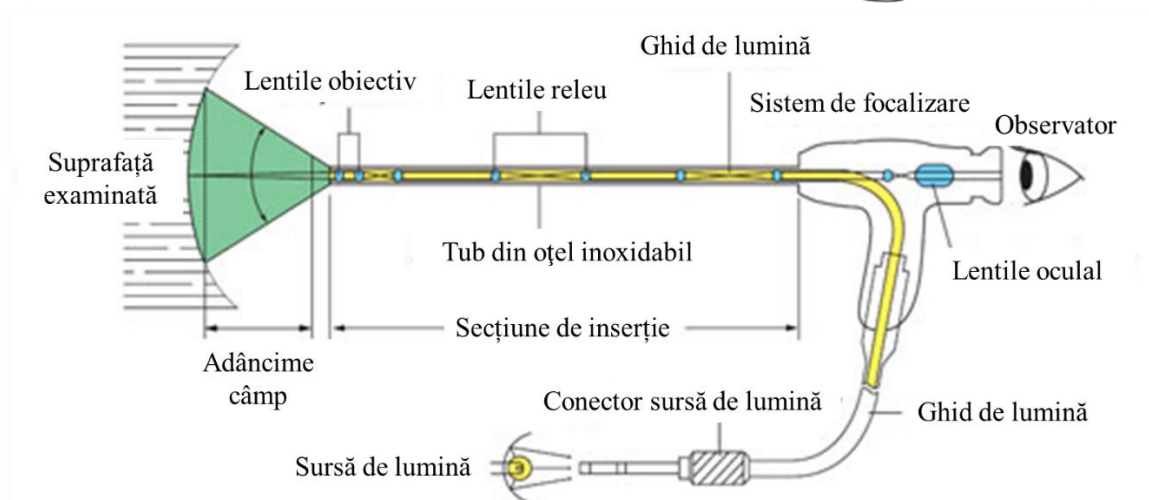
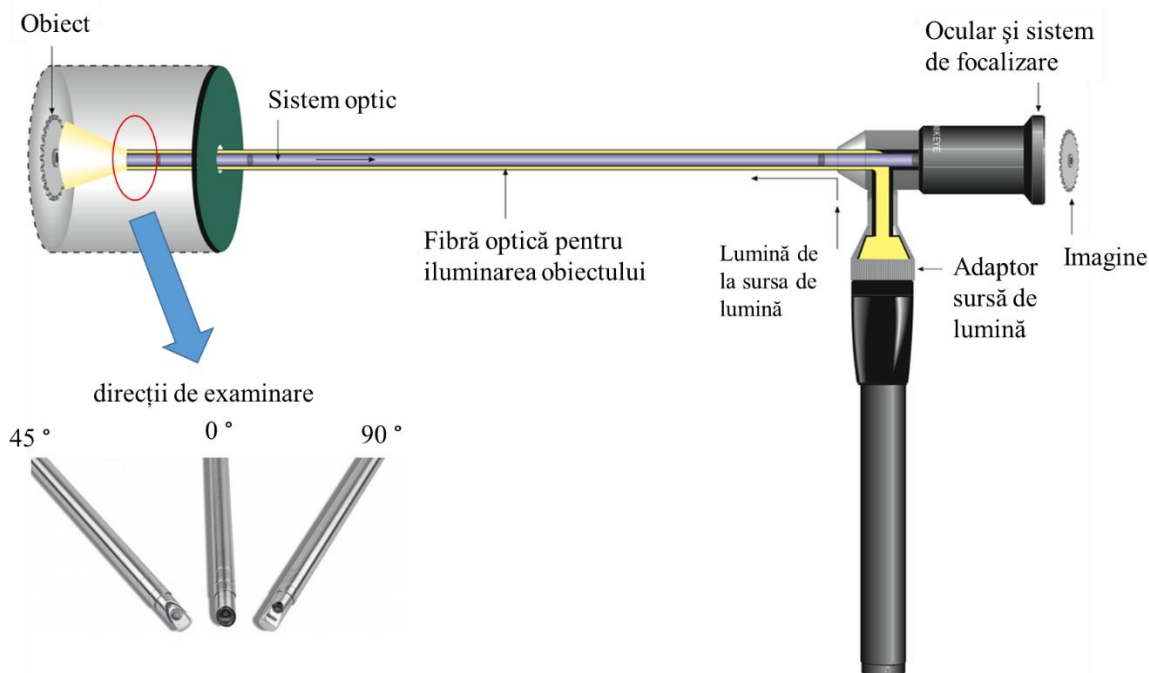


Figura 3. Părțile principale ale unui boroscop [6, 7].

Endoscopul este un dispozitiv de inspecție optico-vizuală asemănător boroscopului, diferența majoră constând în faptul că endoscopul este flexibil. Flexibilitatea endoscopului se datorează utilizării fibrei optice pentru a transmite lumina înspre locul examinat (ghid de lumină) respectiv pentru a transmite imaginea locului examinat către ocularul echipamentului (ghid de imagine). Cei doi ghizi (de lumină și de imagine) sunt realizați din mii de fibre optice foarte subțiri, de înaltă calitate. Fiecare fibră este acoperită cu un strat al cărui indice de refracție este diferit de materialul fibrei, această acoperire acționează ca o oglindă, permițând trecerea luminii de-a lungul fibrei prin procese de reflexie totală.

Transmiterea luminii prin fibrele optice se realizează și dacă fibra optică este îndoită, acest lucru făcând posibilă examinarea unor conducte sau a unor zone imposibil de examinat cu ajutorul boroscopului. Cu cât numărul de fibre ce alcătuiesc ghidul de imagine este mai mare, cu atât calitatea imaginii ce se obține este mai bună. Din acest motiv, fibrele optice ce alcătuiesc ghidul de imagine sunt mai subțiri decât fibrele optice ce alcătuiesc ghidul de lumină

(9-17 μm pentru ghidul de imagine și 30 μm pentru ghidul de lumină) [3]. Un aspect extrem de important, în ceea ce privește ghidul de imagine, este acela că fibrele optice care îl alcătuiesc trebuie să formeze un mănunchi coerent, adică aranjamentul fibrelor trebuie să fie identic la ambele capete.

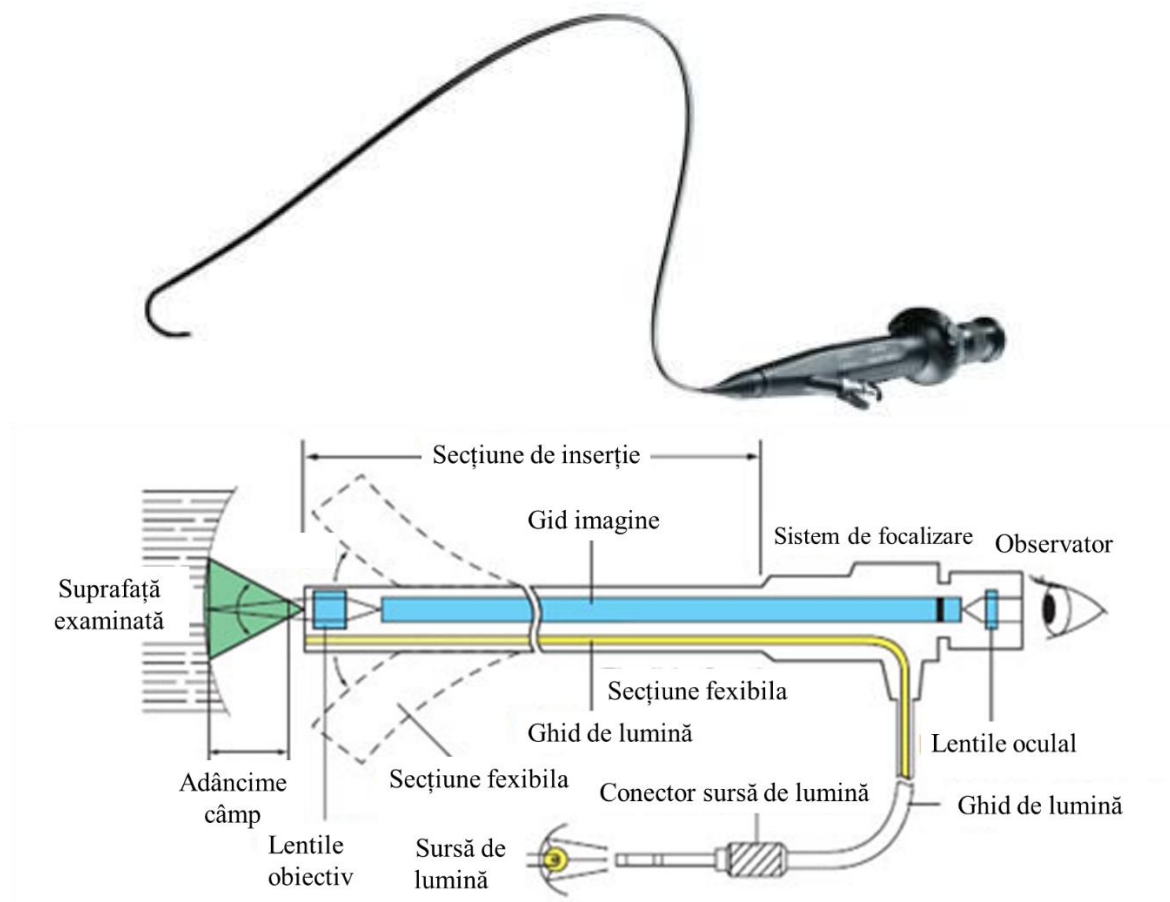


Figura 4. Imaginea unui endoscop și părțile principale ale acestuia [8, 9].

Pe lângă echipamentele mai sus menționate, pentru investigarea suprafețelor greu accesibile, aflate la distanțe mari (de exemplu palele unei turbine eoliene), se folosesc diverse tipuri de *telescoape sau binocluri* care permit mărirea imaginii obiectului/suprafeței de interes.

Scanarea 3D cu ajutorul laserelor este o tehnică din ce în ce mai utilizată. Cu ajutorul ei se obține imaginea 3D a suprafeței de interes, această suprafață putând fi apoi comparată cu imaginea unei suprafețe etalon (fără defecte).

O modernizare a echipamentelor de tip boroscop sau endoscop s-a produs la mijlocul anilor 1990, când a apărut videoscopul. Aceste echipamente diferă față de boroscop sau endoscop prin aceea că imaginea zonei examinate nu este transmisă spre observator prin intermediul lentilelor sau a fibrei optice, ci sub formă de semnal electric produs de o cameră video de înaltă rezoluție. În același timp, în loc ca imaginea suprafeței să fie analizată privind printr-un ocular, aceasta este afișată pe un ecran, conferind operatorului un grad ridicat de comoditate. Având în vedere că transmiterea imaginii se face sub formă de semnal electric, distanța dintre operator și suprafața examinată poate fi de ordinul metrilor sau chiar zecilor de

metri (figura 5). Folosirea diverselor filtre și softuri de îmbunătățire a imaginii (luminozitate, contrast, etc.) permite observarea mult mai facilă a eventualelor defecte. Totodată, posibilitatea de salvare și stocare a imaginilor este un avantaj foarte important în etapa de realizare a raportului controlului optico-vizual.



Figura 5. Tipuri constrictive de videoscoape [10, 11].

Pentru examinarea optico-vizuală a unor conducte de dimensiuni mari (conducte de apă, gaz, petrol, etc.) s-au dezvoltat o serie de echipamente teleghidate precum cele prezentate în figura 6.



Figura 6. Echipamente teleghidate de control optico-vizual pentru examinarea conductelor [12].

Acestea sunt dotate cu surse de lumina LED și camere video de înaltă definiție care pot fi orientate în diverse unghiuri în funcție de zona de interes pentru operator. Multe dintre aceste echipamente sunt subacvatic și au posibilitatea de a se deplasa și pe verticală nu numai pe orizontală. Imaginile înregistrate de aceste echipamente sunt descărcate într-un calculator și apoi examinate de către operator, existând posibilitatea îmbunătățirii lor prin aplicarea diverselor filtre digitale. Acest tip de echipamente pentru control optico-vizual pot avea în dotare și senzori pentru control nedistructiv cu ultrasunete sau curenți turbionari, ceea ce permite investigarea mai în detaliu a unor suprafețe și detectarea eventualelor defecte aflate în interiorul materialului. De asemenea, pe aceste echipamente, este posibilă montarea unor

sisteme de scanare cu laser care sa permită scanarea 3D a suprafeței unei conducte și analiza profilului suprafeței în comparație cu o suprafață etalon.

1.4 Avantajele și dezavantajele inspecției vizuale

Cele mai importante avantaje ale inspecției vizuale sunt:

- este o metodă de control simplă și eficientă, de cele mai multe ori echipamentele necesare fiind ieftine;
- operatorii experimentați și echipamentele avansate fac posibilă o inspecție vizuală foarte sensibilă.
- discontinuitățile piesei examinate sunt efectiv văzute (nu doar observate pe un ecran sub forma variației unui semnal);
- prin această tehnică pot fi puse în evidență cea mai mare parte a discontinuităților de suprafață;
- durata programului de instruire a operatorilor este relativ scurtă;

Dezavantajele inspecției vizuale sunt următoarele:

- este un tip de control cu un înalt grad de subiectivitate. Calitatea controlului depinde foarte mult de experiența și conștiinciozitatea operatorului;
- discontinuitățile care nu sunt la suprafață nu vor fi detectate.

1.5 Bibliografie

[1] C. J. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation, Editura The McGraw-Hill Companies, Inc. 2001, ISBN: 13: 978-0071777148

[2] Judi E. See, Visual Inspection: A Review of the Literature, SANDIA REPORT SAND, 2012, cod: 2012-8590*.

[3] Robert A Smith, Non-Destructive Testing (NDT) – Guidance Document: An Introduction to NDT Common Methods, 2015, Cod document: AA050*.

[4] R. Halmshaw, Introduction to nondestructive testing of welded joints, editura Abington Publishing, 1996, ISBN: 10: 1-85573-314-5

[5] P. Ciorău, D. Coca, I. Crudu et al. Încercarea Materialelor, Controlul nedistructiv al materialelor, Editura Tehnică, Bucuresti 1986.

[6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Borescope#/media/File:BorescopeSchematic.png>*

[7] <https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/remote-visual/rigid-borescopes/>*

[8] <https://www.optronics.com/flexoscope-fiberscopes-small-diameter-visualization.html>*

[9] <https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/remote-visual/industrial-fiberscopes/>*

[10] <https://www.laser-liner.co.uk/product/videoscope-one/>*

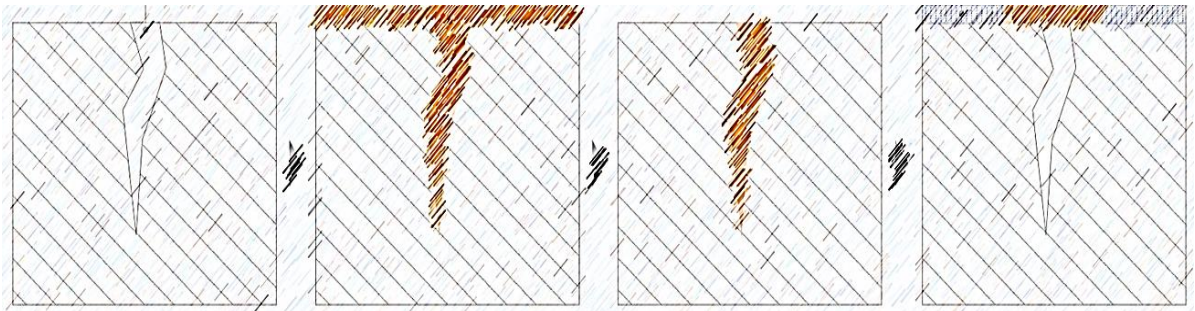
[11] <https://www.ndt.org/rfp.asp?ObjectID=30441&Type=In&category=Visual%3A%3AACCD+Cameras>*

[12] <http://www.scanprobe.com/ipek/ipek-crawler-systems.html>*

* Surse bibliografice disponibile online la data de 05.02.2019

Capitolul 2

Controlul nedistructiv cu lichide penetrante



2.1 Introducere

Controlul cu lichide penetrante este o tehnică ușor de folosit, rapidă, relativ ieftină și drept urmare este o tehnică foarte răspândită. Această tehnică presupune aplicarea unui lichid (penetrant) pe suprafața de examinat, lichid ce va pătrunde în imperfecțiunile suprafeței. Evidențierea acestor imperfecțiuni se face cu ajutorul unui dezvoltant care extrage lichidul penetrant din imperfecțiuni, colorându-se vizibil în zona în care există un defect.

Primele relatări legate de controlul unor suprafețe sunt legate de producerea vaselor ceramice glazurate. Detectarea fisurilor din stratul glazurat se făcea prin frecarea stratului glazurat cu negru de fum. Acesta se depunea în fisurile existente scoțându-le astfel în evidență. În jurul anilor `20, testarea componentelor trenului de rulare al locomotivelor și vagoanelor se făcea prin imersarea acestora într-un amestec de ulei cu kerosen. După scoaterea din acest amestec, componentele erau curățate și acoperite cu o suspensie formată din praf de cretă și alcool. După evaporarea alcoolului din suspensie, întreaga suprafața a componentei supusă testării era acoperită cu un strat alb uniform format din particule fine de cretă. Lovirea cu ciocanul a componentei testate inducea vibrații în aceasta, vibrații care favorizează scurgerea amestecului de ulei cu kerosen din fisurile de suprafață. Existența unei fisuri era semnalată de existența unor zone pătate/colorate pe suprafața albă a componentei testate.

Odată cu introducerea tehnicii de control nedistructiv cu pulberi magnetice, în jurul anilor `30, controlul nedistructiv cu lichide penetrante a fost complet neglijat dispărând practic din uz. Cu toate acestea, exista nevoia unei tehnici de control nedistructiv ușor de folosit care să poată fi folosită și să pună în evidență defectele de suprafață a pieselor din aliaje care nu au comportament feromagnetic. Începând cu anul 1941, tehnica de control nedistructiv cu lichide penetrante a fost revitalizată de adăugarea de coloranți vizibili sau fluorescenți în lichidul penetrant, îmbunătățindu-se astfel foarte mult contrastul dintre indicație și fond. Dezvoltările ulterioare ale acestei tehnici își au originea în dezvoltarea domeniilor aeronautic, aerospațial și nuclear având drept rezultat dezvoltarea de noi tipuri de penetranți și dezvoltanți, care permit punerea în evidență a celor mai mici imperfecțiuni ale suprafeței unei piese.

Cu toate că tehnica de control nedistructiv cu lichide penetrante poate fi văzută ca o îmbunătățire a controlului vizual, această tehnică s-a impus ca tehnică de sine stătătoare datorită faptului că este o tehnică flexibilă, rapidă și relativ ușor de folosit. Avantajul acestei tehnici în comparație cu inspecția vizuală simplă este acela că facilitează mult observarea defectelor (se pot pune în evidență defecte care sunt invizibile ochiului uman). În primul rând, indicațiile obținute în cazul unui defect (oricare ar fi acesta) sunt mult mai mari decât defectul în sine, facilitând punerea în evidență a celor mai mici defecte de suprafață. Este cunoscut faptul că o persoană cu vedere perfectată nu poate distinge detalii mai mici de 0,07 mm. În al doilea rând, contrastul dintre indicație și fundal este foarte mare (de exemplu roșu pe fond alb) facilitând astfel punerea în evidență a defectului.

Cu ajutorul acestei tehnici se poate analiza aproape orice material cu condiția ca suprafața lui să nu fie foarte rugoasă sau foarte poroasă. Această tehnică este folosită cu succes la analiza materialelor metalice (feroase sau neferoase), a materialelor polimerice, a materialelor ceramice etc. *Trebuie subliniat faptul că această tehnică poate pune în evidență doar acele defecte care comunică cu suprafața.*

2.2 Bazele fizice ale controlului cu lichide penetrante

Pătrunderea unui lichid în interiorul cavității unui defect are loc prin capilaritate și este direct influențată de capacitatea lichidului respectiv de a umecta suprafața interioară a defectului. Asupra moleculelor aflate la interfața dintre lichidul penetrant și peretele unui defect se exercită forțe care au legătură cu coeziunea intermoleculară, specifică lichidului penetrant, (forțe de coeziune dintre molecule) și forțe de coeziune, de atracție a mediului solid.

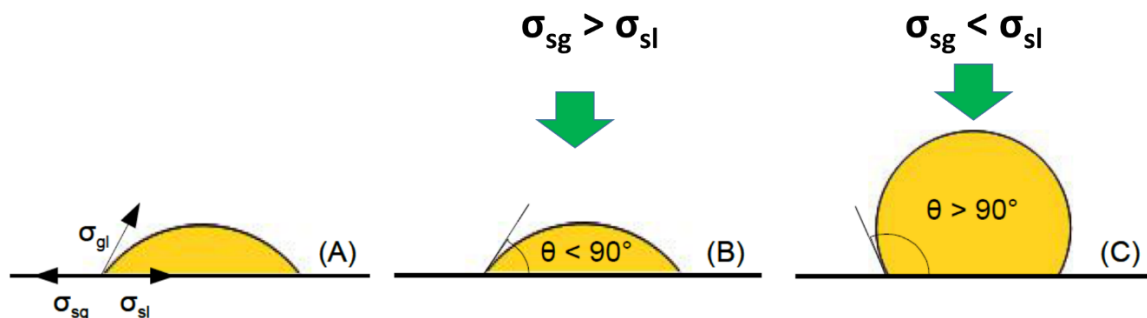


Figura 1. Forțele care acționează la interfața solid-lichid-gaz (A), lichid care umectează suprafața (B) și lichid care nu umectează suprafața (C).

Unghiul de umectare θ variază în funcție de valoare tensiunilor superficiale σ_{gl} (gaz-lichid), σ_{sl} (solid-lichid) și σ_{sg} (solid-gaz). Pentru ca un lichid să umecteze foarte bine o suprafață, unghiul θ trebuie să aibă valori cât mai mici. Se poate observa din figura 1 că valori mici ale unghiului de umectare se obțin dacă $\sigma_{sg} > \sigma_{sl}$. Aceste lichide se numesc lichide tensioactive. În cazul în care valoarea unghiului θ este mai mare de 90° ($\sigma_{sg} < \sigma_{sl}$), se consideră că lichidul respectiv nu umectează suprafața. În cazul în care forțele de atracție dintre mediul solid (tub capilar sau interiorul unei fisuri) și lichid sunt mai mari decât forțele de coeziune intramoleculare specifice lichidului, se va observa că nivelul lichidului din tub este mai mare decât nivelul lichidului din rezervor și meniscul format va fi concav (figura 2). În situația în care forțele de coeziune intermoleculare sunt mai mari, se va observa un fenomen invers (nivelul lichidului în tub este mai mic decât nivelul din rezervor) iar meniscul format va fi convex. Se poate observa (figura 2) că pentru același cuplu lichid-material (materialul din care este făcut tubul capilar), înălțimea la care lichidul urcă în tub este dependentă de diametrul tubului. Presiunea coloanei de lichid din interiorul cavității unui defect sau presiunea capilară p_c se poate calcula cu relația:

$$p_c = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

unde p_c este presiunea capilară, ρ este densitatea lichidului aflat în cavitatea defectului, g este accelerația gravitațională și h este înălțimea coloanei de lichid.

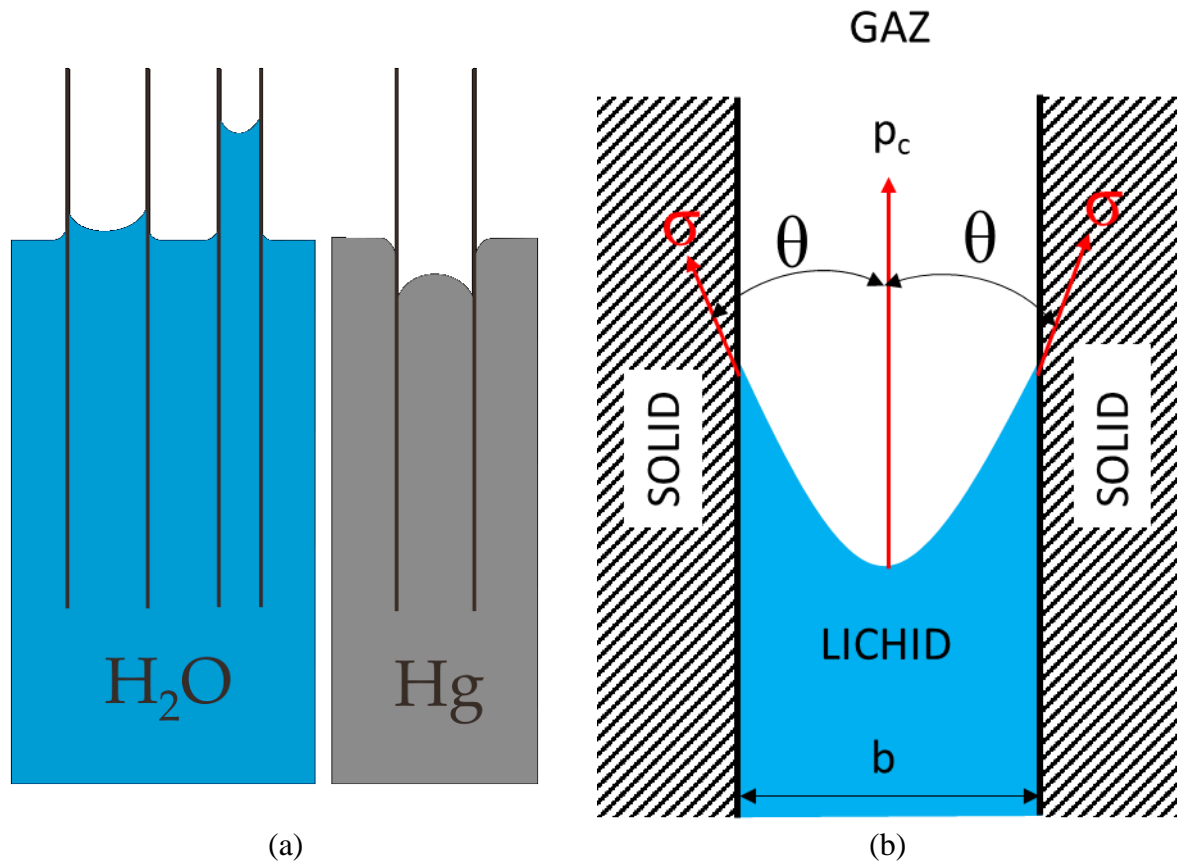


Figura 2. Comportarea unui lichid în contact cu un tub capilar.

Înălțimea coloanei de lichid se poate calcula cu relația:

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{b\rho h} \quad (2)$$

unde σ este coeficientul de tensiune superficială a lichidului penetrant, θ este unghiul de umectare și b este deschiderea (lățimea) defectului [1].

Înlocuind relația 2 în relația 1 rezultă că presiunea capilară în cazul unei fisuri se poate scrie astfel:

$$p_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{b} \quad (3)$$

Se poate observa că există o relație directă între dimensiunile tubului capilar sau a defectului (b) și proprietățile lichidului (σ și θ). Reiese așadar, din ecuația 3, că pentru a putea detecta defecte de dimensiuni mici, lichidele penetrante trebuie să îndeplinească următoarele condiții: să aibă capacitate de umectare cât mai bună, să aibă tensiune superficială cât mai mică, să aibă presiune capilară cât mai mare. Lichidele care îndeplinesc concomitent aceste cerințe se numesc lichide tensioactive și au următoarele caracteristici:

- tensiune superficială mai mică sau egală cu 0.1 N/m;

- unghi de umectare apropiat de 0° (cosinusul unghiului de umectare fiind în acest caz aproximativ egal cu 1);
- presiune capilară cât mai mare. În general, valoarea presiunii capilare pentru aceste lichide nu depășește dublul valorii presiunii atmosferice, situându-se în jurul valorii de $2 \cdot 10^5$ N/m.

Considerând valorile mai sus amintite, se poate determina limita de detecție a acestei tehnici (discontinuitatea de suprafață minimă detectabilă) ca fiind de aproximativ 2-3 μm [2].

2.3 Principiul testării cu lichide penetrante

Procedura exactă care trebuie urmată pentru realizarea unui control nedistructiv cu lichide penetrante este influențată de o serie de factori cum ar fi: tipul de lichid penetrant folosit, compoziția chimică a materialului testat, tipurile de defecte preconizate a fi prezente, condițiile atmosferice (temperatură și presiune atmosferică), etc. Cu toate acestea, controlul cu lichide penetrante presupune parcurgerea următoarelor etape (figura 3) [3]:

1. pregătirea suprafeței;
2. aplicarea lichidului penetrant pe suprafața controlată;
3. îndepărtarea surplusului de lichid penetrant de pe suprafață;
4. aplicarea developantului (revelatorului);
5. examinarea vizuală a suprafeței probei și interpretarea indicațiilor obținute;

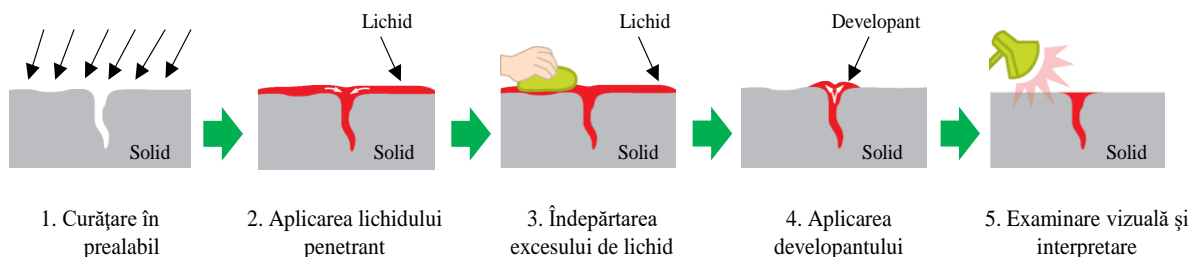


Figura 3. Etapele controlului nedistructiv cu lichide penetrante.

Principalele metode de control nedistructiv cu lichide penetrante sunt [2]:

- *metoda colorării*: punerea în evidență a unui defect de suprafață are loc prin colorarea fondului alb dat de developant de către lichidul penetrant din defect. Defectele apar sub forma unor pete roșii pe fond alb.
- *metoda fluorescentă*: evidențierea prezentei unui defect are loc datorită strălucirii în lumină ultravioletă a lichidului penetrant, extras de către developant din cavitatea defectului.
- *metoda activării cu ultrasunete*: se folosesc ultrasunete pentru o umplere mai bună a cavității defectelor.
- *metoda cu trasor radioactiv*: lichidul penetrant conține substanțe radioactive ce vor impresiona un film fotografic lichid, depus pe suprafața examinată indicând astfel poziția și forma defectului.

2.3.1 Pregătirea suprafeței probei

Operația de pregătire a suprafeței probei presupune curățarea acesteia, în așa fel încât să se realizeze îndepărtarea tuturor impurităților care ar putea împiedica pătrunderea lichidului penetrant în cavitatea defectelor care comunică cu suprafața sau a impurităților care ar putea da indicații false. Această operație este extrem de importantă, de realizarea coresponzătoare a acesteia depinde relevanța rezultatelor obținute. Contaminarea suprafeței unei probe se poate datora unor factori precum: prezența uleiurilor sau unsoarelor (vaselină), a straturilor de vopsea, oxizi, zgură, șpan, nisip și chiar apă rezultată prin condens. Prezența contaminanților organici de tipul uleiurilor sau a vaselinei îngreunează sau chiar blochează accesul lichidului penetrant în cavitatea defectelor. Prezența unui strat de vopsea conduce la efecte similare. Prezența apei condensate pe suprafața controlată îngreunează pătrunderea lichidului în cavitățile defectelor și conduce, concomitent, la diluarea lichidului penetrant și deci la obținerea unor indicații neconcludente. Indicații false rezultă și atunci când suprafața este contaminată cu zgură, nisip sau șpan. Se cunosc o serie întreagă de metode de curățare a suprafețelor, condițiile care se impun acestor metode sunt de a nu masca sau închide defectele de suprafață și de a nu conduce la alterarea lichidului penetrant ce urmează a fi folosit. Cele mai cunoscute metode de curățare/pregătire a suprafeței probei sunt [1]:

- curățarea mecanică - este o tehnică extrem de productivă dar nerecomandată în multe cazuri din cauza probabilității foarte mari de a închide/masca o serie de defecte, precum și capacitatea scăzută a acesteia de a extrage contaminanții din defectele de dimensiuni mici (fisuri înguste).
- spălarea cu apă – este o tehnică ce dă rezultate satisfăcătoare în cazul suprafețelor contaminate cu substanțe care se dizolvă în apă (săruri, substanțe alcaline sau acide) sau atunci când se dorește eliminarea nisipului, a zgurii sau a șpanului de pe suprafață. După spălarea cu apă, o etapă importantă o reprezintă eliminarea apei din cavitatea defectelor, eliminare care se realizează prin încălzirea probei de analizat. Această tehnică dă rezultate nesatisfăcătoare în cazul suprafețelor acoperite cu uleiuri sau grăsimi.
- spălarea în solvenți organici – această tehnică se aplică cu rezultate foarte bune în cazul suprafețelor contaminate cu uleiuri, vaseline, ceară, vopsele, etc. Dezavantajul acestei metode este costul ridicat al solvenților și toxicitatea crescută a acestora. O variantă a spălării în solvenți organici este și spălarea în vapori de solvenți organici. Suprafața supusă operației de curățare este menținută într-o atmosferă bogată în vapori de solvenți, vapori rezultați în urma încălzirii solvenților.
- spălarea cu detergenți – este recomandată în special pentru înlăturarea contaminanților anorganici iar eficiența metodei de curățare crește dacă baia de spălare este încălzită. Băile cu detergenți sunt mai ieftine decât băile cu solvenți organici, mai puțin toxice și mai puțin dăunătoare mediului înconjurător. O atenție sporită trebuie acordată compoziției chimice a băii, astfel încât aceasta să nu reacționeze cu materialul piesei controlate.
- curățarea chimică prin decapare – se realizează în băi încălzite cu caracter acid sau bazic. Pentru ca operația de curățare prin decapare să aibă efectul scontat, este

necesară curățarea în solvenți organici a suprafețelor controlate pentru a înlătura contaminarea cu uleiuri sau alte grăsimi. După realizarea decapării trebuie avute în vedere etape de spălare cu apă, de neutralizare a urmelor de acizi și de uscare a suprafeței supusă curățării. Acest mod de curățare este de evitat atunci când se intenționează utilizarea lichidelor penetrante fluorescente, din cauza efectului negativ a substanțelor de decapare asupra luminescenței componentilor din lichidul penetrant.

- curățarea în băi cu ultrasunete – este o metodă rapidă de curățare (de până la 5 – 10 ori mai rapidă decât decaparea). Folosirea ultrasunetelor permite scăderea temperaturii și a concentrației băii de curățare în comparație cu băile folosite la curățarea chimică.

După etapa de curățare a suprafeței probei, prin oricare din metodele enumerate mai sus, urmează obligatoriu o etapă de uscare a probei care are ca scop eliminarea ultimelor urme de apă sau substanțe folosite la curățare de pe suprafața probei și din cavitățile defectelor. Acestea ar putea împiedica pătrunderea lichidului penetrant în cavitățile defectelor, ar putea reacționa cu lichidul penetrant sau ar putea produce un strat de oxid superficial, compromițând rezultatul controlului.

2.3.2 *Aplicarea lichidului penetrant*

După etapa de curățare și uscare a suprafeței supuse controlului, urmează etapa de aplicare a lichidului penetrant. În cadrul acestei operații trebuie să ne asigurăm că suprafața controlată este acoperită cu un strat subțire și cât mai uniform de lichid penetrant. Cele mai cunoscute moduri de aplicare a penetrantului sunt prin pensulare, pulverizare (cu aer comprimat sau spray-uri) și imersare (se imersează proba supusă controlului într-o baie de lichid penetrant). Pe lângă aceste metode, mai rar, se mai folosește și aplicarea lichidului penetrant prin stropire sau în câmp electrostatic.

După aplicarea penetrantului, acesta este lăsat pe suprafața controlată suficient timp astfel încât o cantitate cât mai mare de lichid penetrant să pătrundă în defectele de suprafață ale piesei. Această durată poartă denumirea de durată sau timp de penetrare. Durata de menținere a penetrantului variază în general între 5 – 60 de minute și depinde de o serie de factori precum: caracteristicile penetrantului (tensiune superficială, unghi de umectare, vâscozitate), dimensiunile defectelor analizate, forma piesei controlate, materialul piesei, modul de aplicare a penetrantului, presiunea atmosferică, temperatura mediului ambiant. etc [4]. De obicei, durata de penetrare este specificată de către producătorul penetrantului. În general, depășirea duratei de penetrare nu influențează în mod negativ rezultatul controlului, cu condiția ca această depășire să nu ducă la uscarea stratului de penetrant depus. Temperatura penetrantului și a suprafeței supuse controlului influențează în mod hotărâtor rezultatul analizei. Astfel, în domeniul de temperatura 10 °C - 50 °C se obțin rezultate optime în cele mai multe cazuri. Creșterea temperaturii peste aceste valori va conduce la o accelerare a procesului de evaporare a penetrantului și respectiv la riscul ca acesta să se usuce pe suprafața analizată. Deoarece tensiunea superficială a majorității materialelor scade odată cu creșterea temperaturii, creșterea temperaturii va conduce la creșterea capacității de umectare a suprafeței și a forțelor capilare. Desigur, reciproca este de asemenea adevărată, scăderea temperaturii va avea un efect negativ

asupra sensibilității controlului. Nu este recomandată realizarea controalelor la temperaturi sub 5 °C. În cazul în care temperatura suprafeței este de 5 – 15 °C trebuie avută în vedere o prelungire a duratei de penetrare, care poate să ajungă la de 2 sau chiar 3 ori durata indicată la temperatura ambiantă [1]. În cazul în care anumite componente ale unor echipamente trebuie testate în timpul funcționării (la temperaturi ridicate sau scăzute) s-au dezvoltat lichide penetrante speciale care pot fi folosite la temperaturi de până la 200 °C. De asemenea, există lichide penetrante special dezvoltate pentru a fi folosite la temperaturi cuprinse între 10 °C și - 5 °C.

2.3.3 Îndepărtarea surplusului de lichid penetrant

Aceasta este cea mai delicată operație a controlului nedistructiv cu lichide penetrante, deoarece penetrantul în exces trebuie îndepărtat de pe suprafața analizată, eliminând totodată cât mai puțin posibil penetrant din cavitatea eventualelor defecte de suprafață. În funcție de tipul lichidului penetrant utilizat, această etapă poate implica îndepărtarea lichidului cu un solvent, prin clătire directă cu apă sau tratarea inițială a suprafeței cu un emulgator, clătire cu apă și apoi tamponare cu un material textil uscat. Îndepărtarea surplusului de lichid penetrant se realizează până la dispariția fondului colorat sau fluorescent dat de acesta. O spălare excesivă a suprafeței va conduce fie la scoaterea penetrantului din defecte, fie la diluarea excesivă a acestuia, conducând astfel la observarea dificilă a indicațiilor și compromiterea rezultatelor controlului. O spălare insuficientă, care lasă lichid penetrant pe suprafața analizată, va conduce la un contrast scăzut (din cauza colorării întregii suprafețe a piesei), unele defecte de dimensiuni mici trecând ușor neobservate. După îndepărtarea surplusului de penetrant suprafața supusă controlului se usucă prin evaporare naturală sau artificială (prin suflarea de aer cald a cărui temperatura nu trebuie să depășească 50 °C).

2.3.4 Aplicarea developantului

Această operație este una foarte importantă și urmărește acoperirea în întregime a suprafeței examinate cu un strat subțire (de obicei sub 100 μm) și cât mai uniform de developant. Developantul aplicat are rolul de a extrage lichidul penetrant din defectele piesei, indicând astfel prezența defectelor de suprafață. Developanții, în funcție de modul de depunere pe suprafața controlată, se clasifică în developanți uscați (de tip pulbere) și developanți umezi (suspensii de pulberi în lichide ușor volatile) [1]. Developanții uscați (pulberi) se aplică pe suprafața controlată prin presărare, sitare, pulverizare sau electrostatic. Suspensiile de developanți se aplică prin pulverizare, imersare sau pensulare, iar înainte de aplicare trebuie să ne asigurăm că pulberile sunt cât mai omogen distribuite în lichid. Se recomandă ca înainte de aplicare să se realizeze operația de omogenizare a developantului prin scuturări energice [4]. Trebuie menționat faptul că, indiferent de tipul de developant folosit sau de metoda de aplicare a developantului, se recomandă ca stratul de developant să fie cât mai subțire deoarece un strat gros de developant ar putea masca prezența unor defecte de dimensiuni mici, în a căror cavitate este reținută o cantitate mică de lichid penetrant. Dacă în cazul developanților uscați extragerea penetrantului din defecte are loc imediat după depunerea lor pe suprafață, în cazul

developanților în suspensie este necesar un timp (zeci de secunde sau chiar minute) în care lichidul suspensiei să se evapore, lăsând în urma stratul subțire și uniform de pulberi.

Timpul de dezvoltare este un parametru extrem de important și reprezintă durata de timp necesară dezvoltantului pentru a extrage lichidul penetrant din cavitățile defectelor unei suprafețe [1, 2]. Această durată, la fel ca durata de penetrare, este prescrisă de producător și se recomandă respectarea întocmai a acesteia. În cazul puțin probabil al absentei unei astfel de indicații, timpul de dezvoltare se poate calcula cu formula [1]:

$$t_d = (0,5 \dots 1) \cdot t_p \quad (4)$$

unde t_d reprezintă timpul de dezvoltare și t_p reprezintă timpul de penetrare. Pentru determinarea timpului optim de dezvoltare, se pot face teste pornind de la formula mai sus menționată. Un timp prea scurt de dezvoltare va conduce la neobservarea unor defecte de dimensiuni mai mici, în timp ce o durată prea lungă de dezvoltare poate conduce la contopirea indicațiilor unor defecte apropiate datorită difuziei penetrantului în stratul de dezvoltant.

2.3.5 Examinarea vizuala și interpretarea rezultatelor

În funcție de tipul penetrantului utilizat, examinarea suprafeței se va face în lumină albă (naturală sau artificială) sau în lumina ultravioletă. Lumina albă având intensitatea minimă de 500 lx se va utiliza în cazul folosirii penetranților colorați, această intensitate putând fi obținută cu o lampă cu incandescență de 100 W, situată la o distanță de 20 cm față de suprafața analizată sau un tub fluorescent de 80 W la o distanță de 100 cm [3]. Radiația ultravioletă se folosește în cazul utilizării lichidelor penetrante fluorescente, iar controlul se realizează în încăperi întunecate sau slab luminate (intensitatea luminii maximă admisă fiind de 20 lx). Radiația ultravioletă este obținută cu ajutorul unor lămpi ce emit lumină a cărei lungime de undă se încadrează în domeniul 330-390 nm [5]. Suprafețele se iluminează astfel încât să nu se producă umbre sau reflexii care ar putea induce în eroare operatorul. În cazul prezenței unor indicații foarte fine pe suprafața controlată, operatorul se poate folosi de o lupă pentru a observa mai bine forma și dimensiunea indicațiilor.

Indicațiile obținute pe o suprafață controlată cu lichide penetrante se clasifică în 3 grupe: concludente, neconcludente și false. Indicațiile neconcludente se obțin datorită executării necorespunzătoare a operațiilor caracteristice controlului nedistructiv cu lichide penetrante [6]. Foarte adesea, o pregătire necorespunzătoare a suprafeței de analizat va conduce la indicații neconcludente. În cazul obținerii unor astfel de indicații, se recomandă repetarea examinării și folosirea aceluiași tip de lichide penetrante pentru a evita eventualele reacții chimice între diferitele tipuri de lichide. Indicațiile false apar cu precădere datorită geometriei probei (solzii cusăturilor sudate sau rugozitate excesivă a suprafeței), a prezenței unor cruste sau oxizi pe suprafața analizată [7]. Înlăturarea deficitară a surplusului de penetrant de pe suprafața analizată conduce la obținerea unor indicații false. Decelarea între indicațiile false, neconcludente și indicațiile date de defecte revine celui care realizează controlul suprafeței, acesta trebuind să elimine toate indicațiile false și neconcludente din studiu.

Interpretarea indicațiilor de defect (indicații concludente) trebuie făcută ținând cont de aspectul acestora, poziția lor pe suprafața piesei analizate și eventuala evoluție a acestor

indicații în timp [2]. O clasificare a indicațiilor concludente și a posibilului lor aspect este prezentată în figura 4.

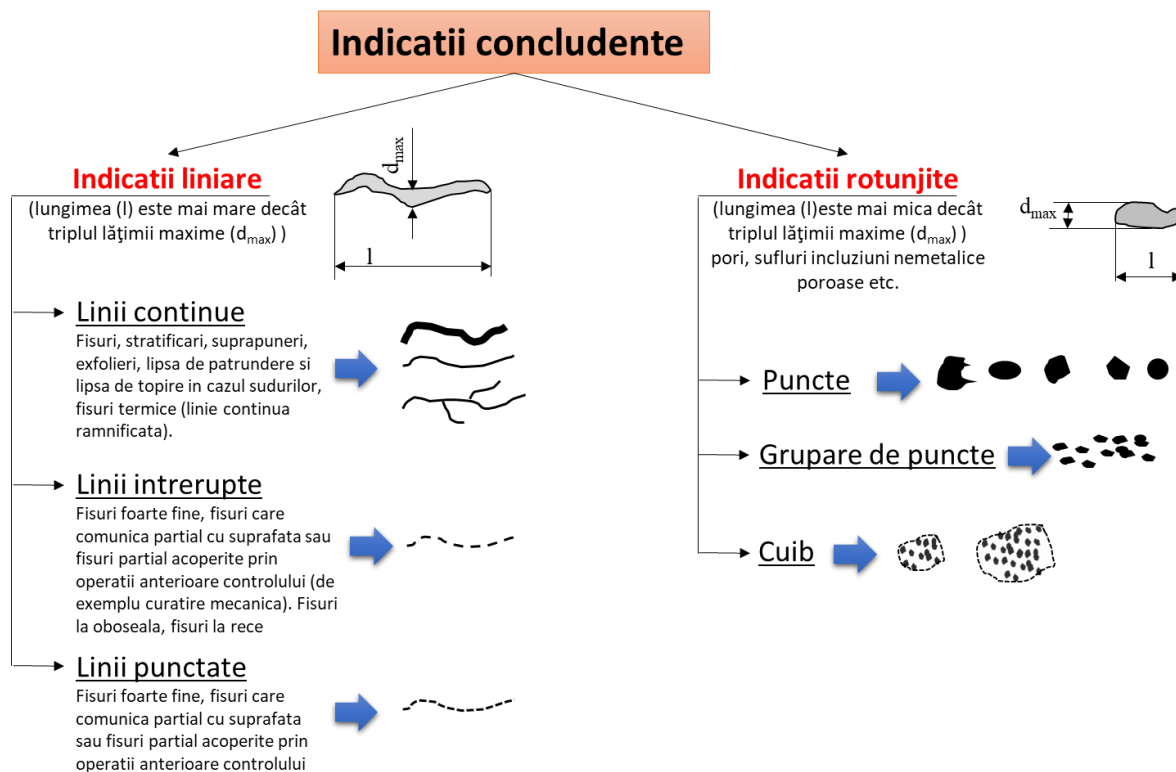


Figura 4. Clasificarea și aspectul indicațiilor concludente (indicații date de defecte).

Dimensiunea unui defect de suprafață poate fi aproximată prin control cu lichide penetrante pe baza dimensiunii și a intensității culorii indicației [8]. O indicație roșie spălăcită evidențiază un defect fin, superficial în timp ce o indicație roșie intensă sugerează prezența unui defect adânc cu o lățime mai mare. Defectele adânci, cu deschidere mare, vor fi vizibile imediat după depunerea dezvoltantului în timp ce defectele fine se vor contura mai repede sau mai târziu în funcție de dimensiunea deschiderii.

Pe baza încercărilor experimentale, au fost trase următoarele concluzii:

- defectele rotunjite fine (de dimensiuni mici) sunt mai ușor de detectat decât defectele liniare fine. Acest lucru se datorează faptului că defectele rotunjite sunt defecte volumice în care poate pătrunde o cantitate mare de lichid penetrant, conducând la o indicație mai clară. În al doilea rând, defectele rotunjite se umplu cu lichid penetrant mult mai repede decât defectele liniare. S-a demonstrat experimental că un defect eliptic, cu raportul între lungime și lățime de 100, se va umple cu penetrant într-o durată de timp de 10 ori mai mare decât un defect cilindric având același volum [9].
- defectele adânci se vor observa mai ușor în comparație cu defectele mai puțin adânci având aceeași deschidere. Acest lucru se explică prin cantitatea mai mare de lichid penetrant stocat în defectele mai adânci. De asemenea, în urma operației de îndepărtare a surplusului de lichid penetrant, operație care îndepărtează și o parte din lichidul aflat în cavitatea defectului, în defectele mai

adânci rămâne o cantitate suficientă de lichid pentru a da o indicație clară. Pe același considerent, defectele cu o deschidere mare se vor observa mai greu în comparație cu defectele cu o deschidere mai îngustă [10].

- defectele situate pe o suprafață netedă sunt mai ușor de observat decât defectele de pe o suprafață rugoasă. În rugozitatea unei suprafețe se depozitează o cantitate importantă de lichid penetrant, care este destul de dificil de înlăturat în cadrul operației de îndepărtare a surplusului de penetrant. După aplicarea dezvoltantului, întreaga suprafață va avea o tentă colorată (de obicei roșu spălăcit), dată de lichidul penetrant din rugozitate, care va diminua contrastul împiedicând astfel observarea unor indicații date de defecte fine [11].
- calitatea suprafeței interioare a unui defect influențează indicația defectului respectiv. S-a constatat că defectele cu suprafață interioară rugoasă sunt mai ușor de observat decât defectele cu suprafață interioară netedă, deoarece marea majoritate a lichidelor penetrante acoperă mai rapid o suprafață rugoasă comparativ cu o suprafață netedă [12].
- în cazul examinării cu lichide penetrante a unor piese aflate în sarcină (de exemplu supuse la oboseală), este de preferat ca acestea să nu fie tensionate sau să fie supuse la tensiuni de tracțiune în timpul testului. Tensiunile de compresiune vor masca parțial sau total defectele fine de suprafață [13].

După analiza indicațiilor obținute urmează operația de marcarea poziției indicațiilor și apoi controlul vizual a acestora. Controlul vizual ajută foarte mult la eliminarea indicațiilor false sau neconcludente și la stabilirea naturii indicațiilor concludente. La realizarea controlului vizual, operatorul se poate folosi de o lupă sau chiar de un microscop. După această etapă, are loc etapa de curățare finală a suprafeței, etapă în care se înlătură dezvoltantul și penetrantul de pe suprafața examinată, prin spălări cu apă sau solvenți potriviți și completarea datelor obținute în buletinul de examinare.

2.4 Tipuri de penetranți și dezvoltanți folosiți în controlul nedistructiv cu lichide penetrante

2.4.1 Penetranți

Alegerea penetrantului se face ținând cont de materialul examinat și de nivelul de sensibilitate cerut examinării. Lichidele penetrante sunt diferite între ele, fiind astfel concepute încât să servească anumitor aplicații care pot să vizeze detectarea unor defecte foarte fine sau foarte mari. Cerințele principale care se impun unui penetrant sunt următoarele [6, 11]:

- să aibă capacitate mare de umectare a suprafeței examinate;
- să pătrundă cu ușurință în cavitatea defectelor prin efect capilar;
- să rămână în cavitatea defectului dar excesul să se poată fi înlăturat ușor de pe suprafața controlată;
- să fie stabil în timp (sa rămână fluid) pentru a putea fi extras din defecte de către dezvoltant;

- să fie foarte vizibil (în cazul penetranților colorați) sau să aibă fluorescență intensă (în cazul penetranților fluorescenți).
- să nu fie coroziv sau dăunător în alt fel materialului examinat;
- să nu fie toxic pentru operator și să nu fie ușor inflamabil sau exploziv.

În funcție de modul de realizare a contrastului (de punere în evidență a defectelor), lichidele penetrante se clasifică astfel [3]:

- penetranți fluorescenți (tip 1);
- penetranți colorați (tip 2);
- penetranți combinați (amestec de penetrant colorat și fluorescent) (tip 3);
- penetranți radioactivi.

Lichidele penetrante se clasifică și în funcție de metoda folosită la îndepărtare excesului de penetrant de pe suprafața examinată astfel [11]:

- penetranți solubili în apă (tip A).
- penetranți cu postemulsionare (tip B și D);
- penetranți solubili în solvenți organici (tip C).

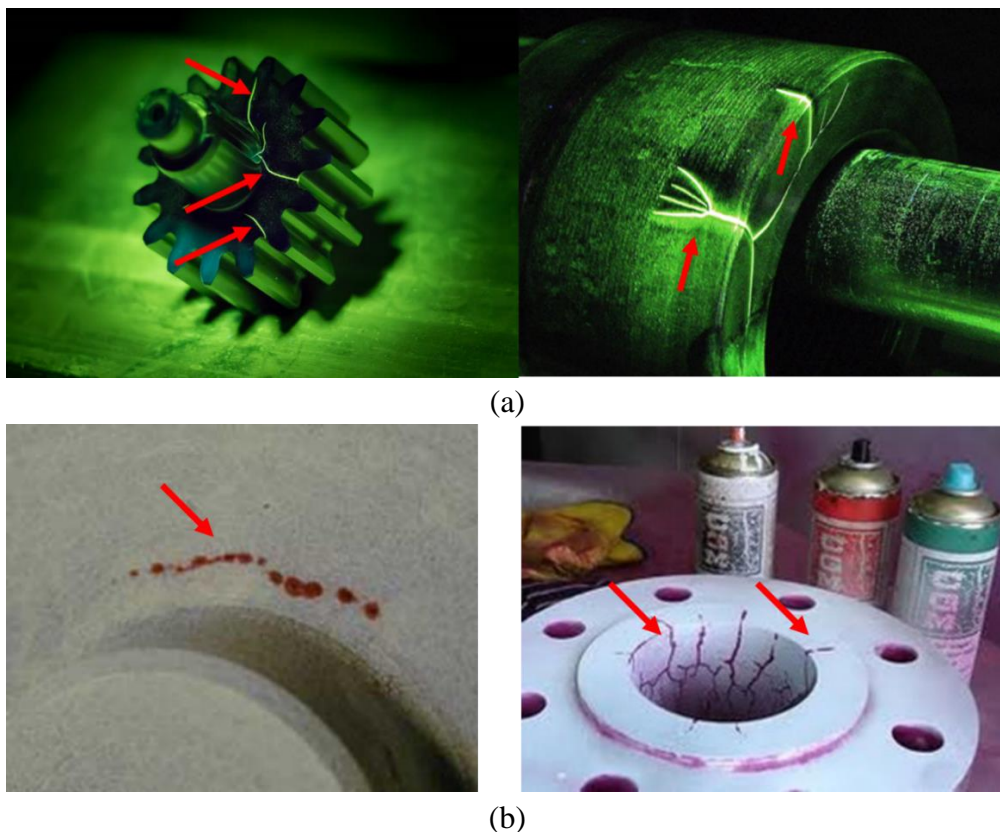


Figura 5. Indicații de defecte obținute prin folosirea penetranților fluorescenți (a) și a penetranților colorați (b) [14 - 17].

Penetranții fluorescenți conțin unul sau mai mulți coloranți care prezintă fluorescență (strălucire) în lumină ultravioletă. În cazul folosirii acestor penetranți, indicația defectului apare de culoare galben-verde pe fond violet închis.

Penetranții colorați conțin un colorant care este de culoare roșie, în marea majoritate a cazurilor, oferind astfel un contrast excelent pe fondul alb dat de developant. Utilizarea penetranților colorați are avantajul că examinarea indicațiilor nu necesită lumină ultravioletă și cameră întunecată. În același timp, examinarea cu lichide penetrante fluorescente este o tehnică mai propice pentru detectarea defectelor cu deschidere mică, datorită sensibilității ochiului uman la fluorescența dată de colorant pe fond întunecat.

Penetranții combinați conțin un amestec de coloranți vizibili în lumina albă și coloranți fluorescenți vizibili în lumină ultravioletă. Această clasă de penetranți este una specială fiind mai rar utilizată.

Penetranții radioactivi conțin substanțe radioactive care impresionează un film radiografic lichid depus pe suprafața examinată (ce joacă rolul de developant) indicând astfel prezența eventualelor defecte de suprafață.

Penetranții solubili în apă, de tipul A, se îndepărtează de pe suprafața examinată prin clătire sau stropire cu apă. Acest tip de penetranți conțin agenți emulgatori (detergenți) care fac posibilă îndepărtarea excesului de penetrant de pe suprafața examinată, folosind doar apă. Din acest motiv acești penetranți se mai numesc și penetranți auto-emulsionați.

Penetranții cu postemulsionare sunt de două tipuri: lipofili (de tip B) și hidrofilii (de tip D). Aceștia pot fi înlăturați de pe suprafața examinată doar prin adăugarea unor emulgatori care să formeze o emulsie stabilă cu excesul de penetrant. Penetranții cu postemulsionare lipofili sunt solubili în ulei și interacționează cu emulgatorul pe bază de ulei formând o emulsie stabilă, care poate fi înlăturată de pe suprafața examinată prin clătire cu apă. Penetranții cu postemulsionare hidrofilii se înlătură de pe suprafața examinată folosind un emulgator, care este un detergent solubil în apă, acesta ridică excesul de penetrant de pe suprafața piesei, excesul este apoi înlăturat prin spălare cu apă. Folosirea penetranților cu postemulsionare se justifică prin aceea că aceștia au capacitate mare de penetrare și, în timpul operației de înlăturare a excesului de penetrant, se înlătură aproape în exclusivitate doar penetrantul de pe suprafața piesei nu și o parte din penetrantul aflat în defecte (cum este cazul penetranților solubili în apă). Din această cauză, sensibilitatea examinării crește semnificativ. Trebuie menționat faptul că, în cazul utilizării penetranților cu postemulsionare, între etapa de aplicare a penetrantului și etapa de îndepărtare a surplusului de penetrant mai apare o etapă suplimentară, etapa de emulsionare.

Penetranții solubili în solvenți organici (de tip C) se înlătură de pe suprafața examinată prin ștergerea acesteia cu ajutorul unui material textil, umezit cu solventul indicat de producătorul penetrantului.

2.4.2 Developanți

Rolul principal al developantului este acela de a extrage penetrantul rămas captiv în cavitatea defectelor de suprafață. Developantul trebuie să ajute la formarea unei indicații cât mai clar vizibile, prin formarea unui contrast cât mai mare între penetrant și developant. Developanții care se folosesc cu lichide penetrante colorate formează un fond alb, fond care permite observarea facilă a indicațiilor (de culoare roșie) date de defecte. Developanții folosiți împreună cu penetranții fluorescenți reflectă și refractă lumina în așa fel încât un flux cât mai

mare de lumină ultravioletă să ajungă la penetrant pentru a crea o indicație cât mai clară. Developanții standard utilizați în acest moment se clasifică astfel [1, 2, 11]:

Developanții uscați (pulbere). Acest tip de developanți se folosesc atunci când nu este nevoie de o sensibilitate crescută a examinării. Sunt developanți ieftini și ușor de aplicat prin pulverizare, presărare, sitare, pensulare sau electrostatic [3]. Având în vedere că aceștia se aplică pe o suprafață uscată, pulberile vor adera la suprafața examinată doar în zona în care există un defect (nu vor crea un fond alb). Din această cauză, acest tip de developanți se folosește arareori împreună cu penetranți colorați.

Developanții solubili în apă. După cum sugerează și numele acestora, developanții solubili în apă constau dintr-un grup de substanțe chimice care sunt dizolvate în apă și formează un strat de developant, atunci când apa în care sunt dizolvate este evaporată. Cea mai bună metodă de aplicare a developanților solubili în apă este prin pulverizare, suprafața examinată putând fi umedă sau uscată. Developanții solubili în apă mai pot fi aplicați și prin imersare, stropire, pensulare dar aceste metode conduc la rezultate mai slabe. Acest tip de developanți nu se recomandă a fi folosiți împreună cu penetranți colorați.

Developanții în suspensie apoasă. Acești developanți sunt suspensii de pulberi în apă (pulberi insolubile în apă), iar aplicarea lor pe suprafața examinată se face similar cu a developanților solubili în apă. Înaintea pulverizării acestui tip de developant se recomandă omogenizarea energetică a suspensiei pentru a-i crește gradul de omogenitate. După aplicare, suprafața este uscată în curent de aer cald.

Developanții pe baza de solvent. Acești developanți constau din pulberea de developant ce se află în suspensie într-un solvent volatil. Se aplică prin pulverizare iar datorită volatilității solventului, uscarea forțată a suprafeței (în curent de aer cald) după depunerea developantului nu mai este necesară.

Developanți speciali. Aceștia sunt sub forma de lacuri și se folosesc în mod special atunci când se dorește o înregistrare permanentă a examinării (a indicațiilor obținute).

Indiferent de tipul de developant utilizat, acesta trebuie să satisfacă concomitent și cât mai bine următoarele cerințe:

- să fie cât mai ușor de aplicat și să formeze un strat subțire și uniform pe suprafața examinată;
- să extragă cât mai eficient developantul din cavitatea defectului și să asigure un contrast cât mai bun între indicația defectului și fond;
- să fie ușor de înlăturat de pe suprafață și să nu reacționeze cu materialul piesei examinate;
- să nu fie toxic pentru operator.

Pe baza celor menționate mai sus s-a întocmit o schemă generală a tehnologiei controlului nedistructiv cu lichide penetrante (figura 6).

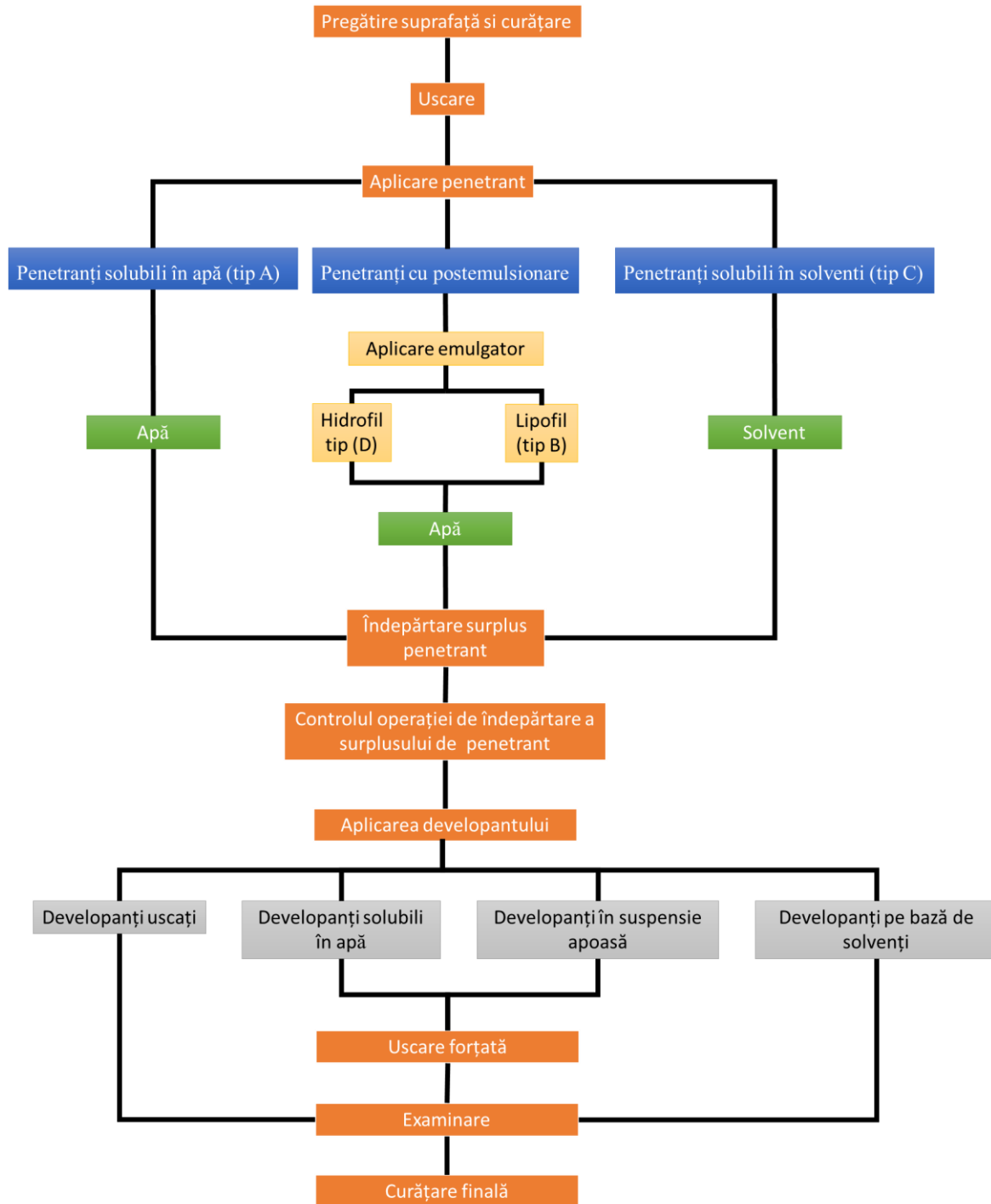


Figura 6. Schema generală a tehnologiei controlului nedistructiv cu lichide penetrante.

2.5 Avantajele și dezavantajele controlului nedistructiv cu lichide penetrante

Avantajele principale ale acestei tehnici sunt:

- sensibilitate ridicată (poate fi pusă în evidență prezența unor defecte de dimensiuni foarte mici);
- se poate aplica aproape tuturor materialelor (metalice sau nemetalice, magnetice sau nemagnetice, conducătoare sau izolatoare electrice);

- este o tehnică rapidă și permite examinarea unor suprafețe mari;
- este aplicabilă la examinarea unor piese cu geometrie complexă;
- indicația se obține direct pe suprafața examinată și dimensiunea indicației este, într-o oarecare măsură, o indicație a dimensiunii defectului;
- este o tehnică portabilă, nu întotdeauna examinarea trebuie realizată în laboratoare speciale;
- este o metodă ieftină.

Dezavantajele principale ale acestei tehnici sunt următoarele:

- se pot pune în evidență doar acele defecte care comunică cu suprafața (defecte deschise);
- nu se aplică suprafețelor poroase;
- suprafața examinată trebuie curățată corespunzător înaintea aplicării penetrantului;
- operatorul trebuie să aibă acces direct la suprafața examinată;
- calitatea suprafeței poate influența rezultatul examinării;
- este o examinare care presupune parcurgerea riguroasă a unor etape specifice;
- este necesară curățarea piesei/suprafeței după examinare;
- se impun condiții de manipulare și păstrare corespunzătoare pentru materialele folosite (penetranți, developanți, emulgatori, solvenți etc).

2.6 Sensibilitatea examinării cu lichide penetrante

Sensibilitatea examinării cu lichide penetrante se referă la dimensiunile minime ale defectelor ce pot fi detectate. Astfel, sensibilitatea examinării cu lichide penetrante se poate defini cu ajutorul a doi factori: factorul de amplificare a deschiderii discontinuității (f_m) și factorul de amplificare a strălucirii indicației (f_s) [2].

$$f_m = \frac{x}{b} \quad (4)$$

unde x este lățimea indicației defectului și b este lățimea reală a defectului (figura 7).

$$f_s = \frac{s_i}{s_f} \quad (5)$$

unde s_i reprezintă strălucirea indicației și s_f reprezintă strălucirea fondului. Sensibilitatea geometrică a examinării (s_g) se determină cu relația:

$$s_g = \frac{f_m - 1}{f_m} \quad (6)$$

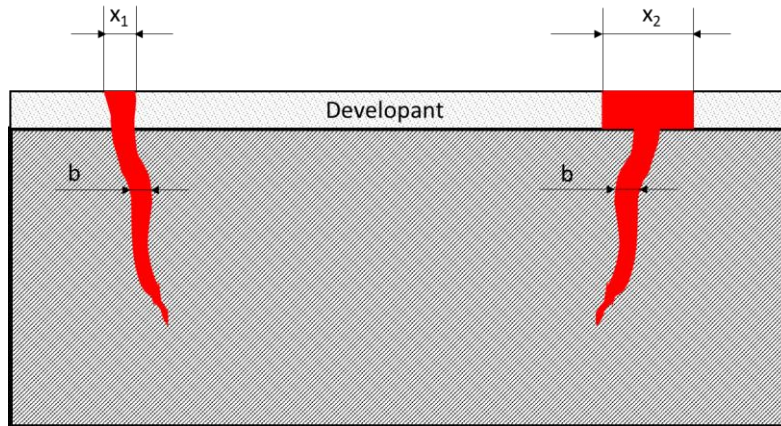


Figura 7. Determinarea sensibilității examinării cu lichide penetrante.

Sensibilitatea optică a examinării (s_0) poate fi calculată cu relația:

$$s_0 = \frac{f_s - 1}{f_s} \quad (7)$$

Analizând relațiile de mai sus, putem trage concluzia că sensibilitatea unei examinări cu lichide penetrante este cu atât mai mare cu cât lățimea indicației este mai mare decât lățimea efectivă a defectului ($x > b$), și cu cât strălucirea indicației dată de defect după developare este mai mare decât strălucirea fondului ($s_i > s_f$). Asigurarea unei sensibilități corespunzătoare în cazul unei examinări cu lichide penetrante este condiționată de respectarea cu strictețe a tehnologiei controlului cu lichide penetrante, de calitatea materialelor utilizate și de respectarea indicațiilor de utilizare date de producătorul materialelor utilizate (penetranți, developanți, solvenți, emulgatori, etc.). Creșterea gradului de sensibilitate a unei examinări se poate face printr-o umplere mai eficientă a cavitației defectelor cu penetrant. Acest lucru se poate face prin realizarea operației de penetrare în vid, prin încălzirea piesei examinate, prin vibrarea acesteia sau combinații a acestor metode [2]. La aplicarea acestor metode trebuie avut grijă ca acestea să nu conducă la deteriorarea proprietăților lichidului penetrant. În condiții obișnuite, examinarea cu lichide penetrante este suficient de sensibilă pentru a pune în evidență defecte a căror deschidere are dimensiuni ce se încadrează în domeniul 0.1 – 5 mm. Folosind penetranți fluorescenți speciali se poate ajunge la punerea în evidenta a unor defecte a căror deschidere este de 0.25 μm .

Sensibilitatea examinării cu lichide penetrante depinde foarte mult și de condițiile atmosferice, temperatura la care se realizează controlul fiind un factor definitoriu. În cazul în care se intenționează utilizarea unor lichide penetrante la temperaturi care sunt în afara domeniului indicat de producătorul penetrantului (de obicei 10 °C – 50 °C), se recomandă realizarea unor teste preliminare, care vizează determinarea duratei de penetrare optime și a duratei de developare, pentru condițiile în care se dorește a se realiza controlul. Aceste teste se realizează prin comparație cu ajutorul blocurilor de control (blocuri de comparație) care pot fi monobloc sau blocuri separate așa cum se poate observa în figura 8.

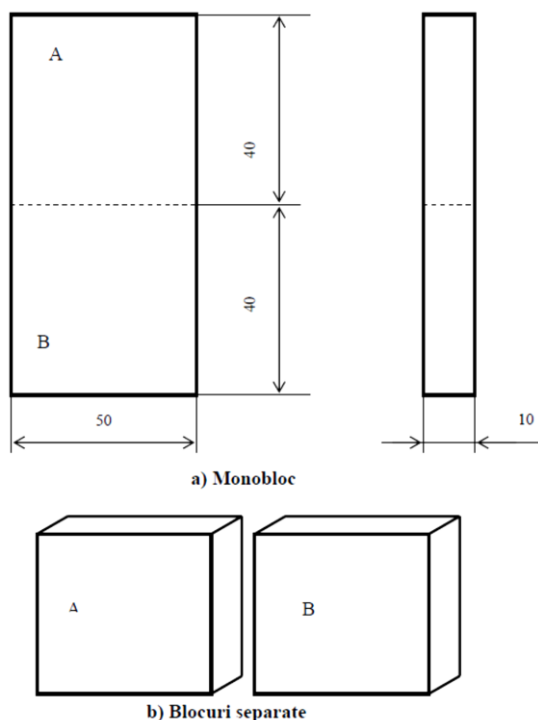


Figura 8. Blocuri de comparație pentru testarea sensibilității lichidelor penetrante (dimensiunile blocurilor sunt orientative) [3].

În acest moment există două metode bazate pe comparația dintre indicațiile obținute pe blocurile de control, diferența dintre acestea constând în modul de realizare a defectelor de suprafață.

Metoda 1. Blocurile de control (monobloc sau blocuri separate) se realizează din aluminiu iar în centrul fiecărei fețe (notate cu A și B) se trasează un cerc cu diametru de 25 mm cu ajutorul unui creion termocrom. Fața opusă cercului trasat se încălzește cu flacără până la atingerea temperaturii de 510 °C – 525 °C și apoi blocurile sunt scufundate în apă rece. Ca urmare a răcirii bruște, pe suprafața blocurilor de control vor apărea o serie de fisuri termice foarte fine. Pe una din suprafețe se va realiza un control respectând indicațiile de temperatură furnizate de producător, iar pe cealaltă suprafață se va realiza controlul în condițiile atmosferice care ne interesează (temperatura diferită de domeniul de temperatură prescris de producător).

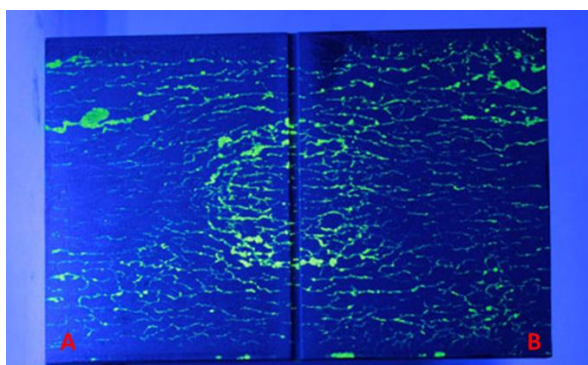


Figura 9. Testarea sensibilității lichidelor penetrante cu blocuri comparatoare cu fisuri induse termic [18].

Indicațiile obținute pe cele două suprafețe se vor compara, trăgându-se concluzia dacă examinarea este fezabilă sau nu la temperatura respectivă. Trebuie menționat că, pentru determinarea parametrilor optimi ai controlului cu lichide penetrante, este nevoie de mai multe astfel de teste în care se va varia durata de penetrare și durata de dezvoltare.

Metoda 2. Se utilizează o plăcuță comparatoare din oțel inoxidabil care a fost cromată dur (grosime strat 250 μm) pe o față. Fața cromată a fost în prealabil supusă operației de rectificare. Pe fața opusă feței cromate se imprimă, cu ajutorul unui penetrator Brinel cu diametru de 5 mm, amprente folosind forțe de apăsare cuprinse în intervalul 20 – 70 N [3]. Lățimea fisurilor din stratul cromat este proporțională cu forța aplicată și poate varia în intervalul 2 – 20 μm.

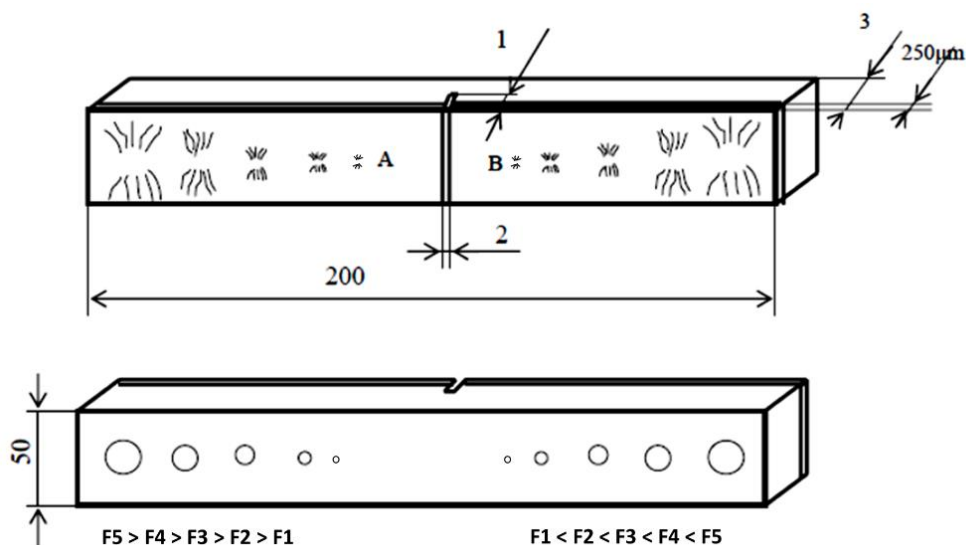


Figura 10. Plăcuță comparatoare pentru testarea sensibilității controlului cu lichide penetrante.

Se vor obține seturi de fisuri, fisurile obținute cu forțe identice vor avea lățimi relativ identice, care pot fi folosite pentru testarea sensibilității unui lichid penetrant, în condiții de temperatură în afara domeniului indicat de producător.

De asemenea, cu aceste metode se poate analiza comparativ sensibilitatea a două tipuri diferite de lichide penetrante, testele realizându-se în condiții atmosferice identice.

2.7 Controlul nedistructiv cu penetranți gazoși

Această metodă folosește pe post de penetrant un amestec gazos format din 95 % kripton inert, stabil (Kr_{78}^{36}) și 5 % un izotop radioactiv al kriptonului (Kr_{85}^{36}). Modul de lucru este oarecum similar cu cel al controlului nedistructiv cu lichide penetrante. Suprafața examinată este supusă unui proces de curățare mecanică și/sau chimică, apoi piesa este introdusă într-o incintă care va fi vidată. Vidarea incintei cu piesa în interior are drept scop eliminarea moleculelor de aer adsorbite pe suprafața examinată și implicit pe suprafața internă a defectelor care comunică cu suprafața. Piesa este apoi supusă unui jet de kripton, gaz care difuzează foarte ușor în cele mai fine discontinuități ale suprafeței, dar care se adsoarbe și pe suprafața piesei. Înlăturarea gazului de pe suprafața piesei se realizează prin admisia aerului în incinta vidată, în care se află piesa examinată. În acest fel, kriptonul (gaz mai greu decât aerul de aproximativ

3.5 ori) va rămâne captiv în cavitatea defectelor de suprafață. Punerea în evidență a defectelor se realizează prin depunerea (prin pulverizare) unui strat subțire de emulsie fotosensibilă, ce va fi impresionată de cuantele de energie emise de izotopul radioactiv. Indicația unui defect pe pelicula fotosensibilă va fi de culoare închisă. Pelicula fotosensibilă, purtând indicațiile defectelor de suprafață, se desprinde de pe suprafața examinată și poate fi analizată cu echipamente speciale cu celule fotoelectrice.

Datorită ușurinței amestecului de gaz de a pătrunde în cele mai mici discontinuități ale suprafeței piesei, controlul nedistructiv cu penetranți gazoși are o sensibilitate sporită față de controlul cu lichide penetrante. Acest tip de examinare permite detectarea defectelor cu deschidere cuprinsă în domeniul $1 \text{ mm} - 10^{-4} \text{ mm}$, fiind deci cu aproximativ 3 ordine de mărime mai sensibil decât controlul cu lichide penetrante [2]. În același timp, datorită faptului că radiațiile emise de izotopul radioactiv penetrează ușor materialul examinat, indicațiile defectelor vor fi mult mai mari decât defectul în sine (de aproximativ 10 ori). Un dezavantaj al acestei metode este acela că nu permite punerea în evidență a defectelor cu deschidere mare, deoarece în etapa de admisie a aerului în incinta vidată are loc îndepărtarea gazului, nu numai de pe suprafața examinată ci și din defectele cu deschidere mare. Din cauza acestui neajuns, se recomandă folosirea acestei tehnici în tandem cu controlul cu lichide penetrante, în special lichide penetrante fluorescente, rezultatele acestora completându-se reciproc.

2.8 Bibliografie

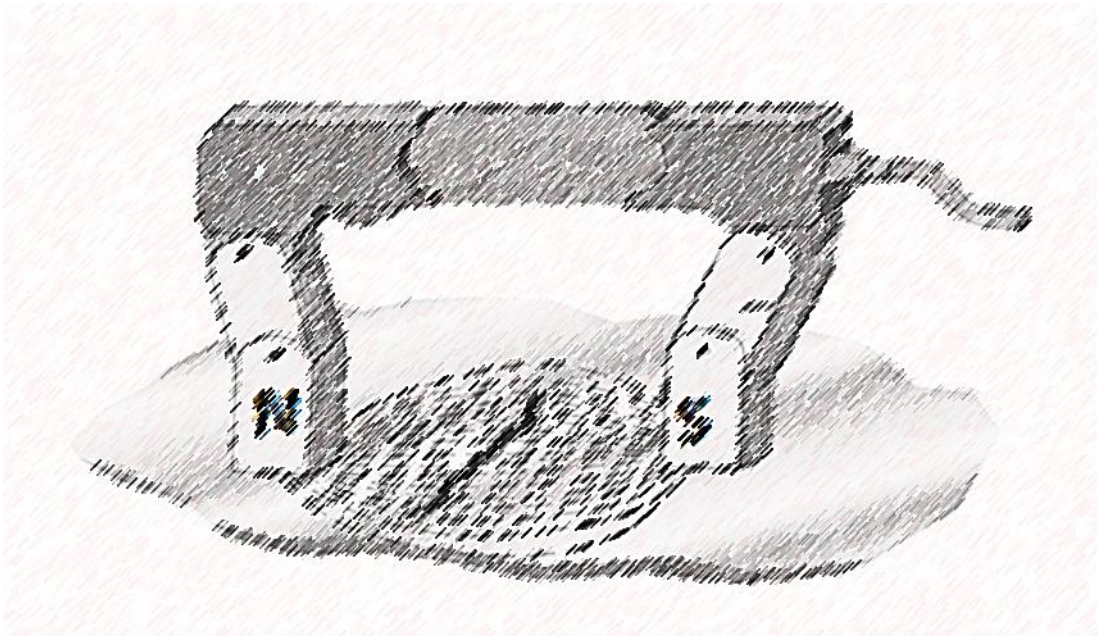
- [1] P. Ciorău, D. Coca, I. Crudu et al. Încercarea Materialelor, Controlul nedistructiv al materialelor, Editura Tehnică, Bucuresti 1986.
- [2] Voicu Ionel Safta, Voicu Ioan Safta, Defectoscopie nedistructivă industrială, Editura Tehnică, Timișoara, 2001, ISBN 973-99425-6-3.
- [3] *** Examinarea cu lichide penetrante a îmbinărilor sudate ale instalațiilor mecanice sub presiune și ale instalațiilor de ridicat, Reglementare tehnică națională, Prescripție tehnica PT CR 6-2003, ISCIR.
- [4] <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/communitycollege.htm>*
- [5] T. Luthi, Non-Destructive Evaluation Methods, 2013, disponibil online*:
[https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edx/MSE-610%20\(2014\).pdf](https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edx/MSE-610%20(2014).pdf)
- [6] A. Hijazi, Introduction to Non-Destructive Testing Technique, disponibil online*:
<https://eis.hu.edu.jo/acuploads/10526/Liquid%20Penetrant%20Testing.pdf>
- [7] P. E. Mix, Introduction to Nondestructive Testing, A training guide, Editura, Wiley-Interscience, 2005, ISBN-13 978-0-471-42029-3.
- [8] M. Bodea, Sudare și procedee conexe, Editura UTPress, Cluj-Napoca, 2016, ISBN 978-606-737-143-7
- [9] P. Kauppinen, J. Sillanpaa, Reliability of Surface Inspection Methods, Proceedings of the 12th World Conference on Non-Destructive Testing, Amsterdam, Vol.2, 1989, 1723-1728.
- [10] J.R. Alburger, Dimensional Transition Effects in Visible Color and Fluorescent Dye Liquids, Proceedings, 23rd Annual Conference, Instrument Society of America, Vol. 23, Part I, Paper No. 564.

- [11] B. F. Larson, Study of the Factors Affecting the Sensitivity of Liquid Penetrant Inspections: Review of Literature Published from 1970 to 1998, Editura Office of Aviation Research Washington, D.C., 2002, disponibil online*:
https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollegePenetrantTest/Larson_FPI_Literature_Review.pdf
- [12] W. E. Thomas, An Analytic Approach to Penetrant Performance, Nondestructive Testing, Vol. 21, No. 6, 1963, pp. 354-368.
- [13] R. Clark, W. D. Dover, L. J. Bond, The Effect of Crack Closure on the Reliability of NDT Predictions of Crack Size, NDT International, Vol. 20, No. 5, 1987, pp. 269-275.
- [14] https://www.superiorjt.com/services/nondestructive-testing*
- [15] http://www.aigh.com.mx/wp-content/uploads/2016/07/INSPECCION-150x150.jpg*
- [16] http://rofikdwibelfa.blogspot.com/2013/12/ndt-mptlpt.html*
- [17] https://dir.indiamart.com/chennai/liquid-penetrant-testing.html*
- [18] http://www.inspectesting.com/liquid-penetrant.html*

* Surse bibliografice disponibile online la data de 16.10.2018

Capitolul 3

Controlul nedistructiv cu pulberi magnetice



3.1 Introducere

Primele relatări ale utilizării câmpului magnetic pentru detectarea defectelor prezente într-un material, relatări ce datează din anul 1868, se referă la verificarea țevelor de tun. După turnare, țevele de tun erau magnetizate iar un „inspector” verifica cu ajutorul unei busole dacă țeava are sau nu fisuri. În zona în care existau fisuri în țeava de tun, se observa o deviație semnificativă a acului busolei din poziția sa firească. La începutul anilor 1920, William Hoke a observat că bucățile de dimensiuni mici de șpan, rezultate în urma prelucrării unor oțeluri, se acumulează pe mandrina echipamentului formând un model ce corespundea foarte bine cu fisurile existente în mandrină. Acesta a observat că defectele de suprafață, sau din imediata apropiere a suprafeței, determină o distorsionare a liniilor de câmp magnetic și că, în zona defectului, liniile de câmp magnetic ies din material. Așadar, a concluzionat că folosirea unor particule/pulberi magnetice și a unui câmp magnetic poate fi o metodă de a pune în evidență defectele unui material.

În principiu, controlul nedistructiv cu pulberi magnetice este o tehnică simplă, ieftină și ușor de implementat. Această tehnică poate pune în evidență doar defectele de suprafață sau defectele ce se află în imediata vecinătate a suprafeței (3 – 5 mm) și poate fi aplicată doar materialelor feromagnetice. În general, materialele feromagnetice folosite industrial sunt cele pe baza de Fe, Ni, Co sau aliaje cu conținut ridicat din aceste elemente. În principiu, aceasta tehnică constă în magnetizarea piesei supusă controlului și depunerea pe suprafața acesteia a unei pulberi feromagnetice fine. În zonele unde există defecte se va forma un câmp magnetic de dispersie sau câmp magnetic de scăpări, datorită faptului că liniile de câmp magnetic vor ocoli defectul, fiind nevoite să iasă în afara materialului piesei. În aceste zone, cu câmpuri de scăpări, se va observa aglomerarea pulberilor feromagnetice depuse pe suprafața piesei, ceea ce se constituie în indicația defectelor respective.

Fenomenul fizic, care permite punerea în evidența a defectului, este apariția câmpului de dispersie, în zona care conține defectul, și nu faptul că are loc aglomerarea particulelor în zona câmpului de dispersie. Cu toate acestea, în acest moment, marea majoritate a controalelor de acest tip se face cu ajutorul pulberilor magnetice. Există totuși și metode în care se măsoară intensitatea câmpului magnetic care scapă din proba în zonele în care există defecte și se formează aceste câmpuri de dispersie.

3.2 Noțiuni introductive de magnetism tehnic

Aproape oricine știe ce poate face un material magnetic dar puțini sunt cei care înțeleg „funcționarea” unui magnet. Pentru a înțelege modul în care funcționează un magnet trebuie mai întâi să înțelegem legătura dintre magnetism și electricitate. Un electromagnet simplu se poate realiza prin înfășurarea unui fir de cupru în forma unei spire și conectarea acestuia la o baterie. Spira parcursă de curentul electric va genera un câmp magnetic care va persista atâta timp cât spira este alimentată de la baterie. Această spiră se poate echivala cu un dipol magnetic al cărui moment magnetic este dat de relația:

$$\mu = I \cdot S \quad (1)$$

unde I reprezintă curentul care trece prin spiră iar S reprezintă suprafața spirei.

Un magnet obișnuit nu trebuie conectat la o sursă de electricitate pentru ca acesta să genereze câmp magnetic. În aceste condiții se pune problema: Cum funcționează? Originea magnetismului acestuia este de natură subatomică, particulele constituente ale atomului (electronii și nucleonii) generând prin mișcarea acestora două tipuri de curenți microscopici: curenți orbitali – legați de mișcarea orbitală în jurul nucleului și curenți de spin – legați de mișcarea de spin a electronului (rotație în jurul propriei axe) [1]. Acești curenți sunt sursa magnetismului unui magnet permanent.

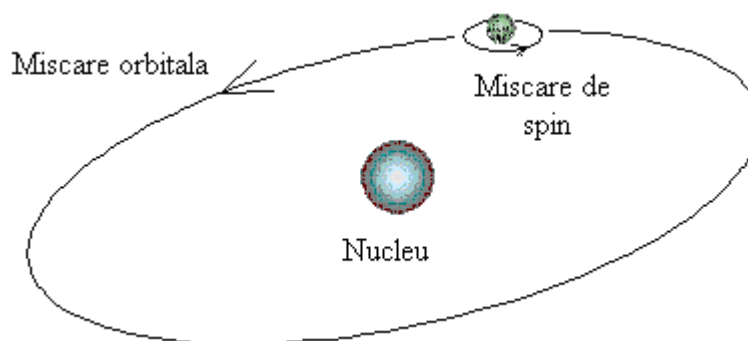


Figura 1. Mișcarea orbitală și de spin a electronului în jurul nucleului.

Din punct de vedere cantitativ, magnetismul unei substanțe este caracterizat de momentul său magnetic μ , care este o mărime vectorială [1]. Deși toate elementele și substanțele au momente magnetice, datorate particulelor constituente ale atomilor, doar anumite materiale sunt denumite materiale magnetice. Clasificarea materialelor magnetice se poate face după valoarea momentului magnetic atomic:

- $\mu_{at} = 0$ substanțe diamagnetice;
- $\mu_{at} \neq 0$;

În cazul substanțelor cu $\mu_{at} \neq 0$ se diferențiază două clase de substanțe: substanțe paramagnetice (nu au interacțiuni între momentele magnetice atomice), și substanțe cu ordonare magnetică (există interacțiuni între momentele magnetice atomice).

Substanțele diamagnetice au valoarea magnetizării egală cu zero în absența câmpului magnetic, iar în prezența acestuia, se magnetizează în sens contrar câmpului aplicat.

Substanțele paramagnetice au valoarea magnetizării egală cu zero în absența câmpului magnetic, dar în prezența acestuia, se magnetizează în sensul câmpului aplicat.

Substanțele cu ordonare magnetică pot fi feromagnetice (ordonare paralelă a μ_{at}), antiferomagnetice (ordonare antiparalelă a μ_{at}) și ferimagnetice (ordonare antiparalelă a μ_{at} dar fără compensare totală a acestora).

1 H																	2 He								
																5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne				
3 Li	4 Be																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
11 Na	12 Mg																	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr								
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe								
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn								
87 Fr	88 Ra	89 Ac	↓																						
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu									

Figura 2. Tabelul periodic ale elementelor cu clasificarea substanțelor din punct de vedere magnetic.

Materialele feromagnetice au momentele atomice aranjate paralel, ca urmare a interacțiunii de schimb. De cele mai multe ori, un material feromagnetic are o magnetizație nulă în absența unui câmp extern, din cauza existenței unor domenii în care momentele atomice sunt paralele. Aceste domenii sunt denumite domenii Weiss. Valoarea și orientarea vectorului magnetizare, este diferită pentru fiecare domeniu, astfel încât, per total, suma vectorilor este nulă.

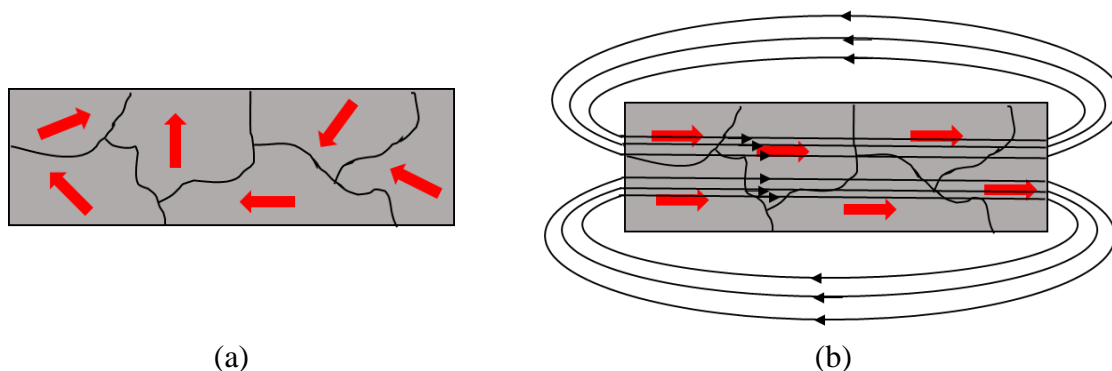


Figura 3. Orientarea magnetizării domeniilor Weiss în absența unui câmp magnetic extern (a) și orientarea magnetizării domeniilor Weiss în prezența unui câmp magnetic extern (b).

În prezența unui câmp extern, structura de domenii se modifică, are loc alinierea magnetizării domeniilor magnetice de-a lungul câmpului magnetic aplicat. Acest lucru conduce la apariția unei magnetizări puternice a materialului. Magnetizarea materialului scade cu creșterea temperaturii, iar la temperaturi superioare temperaturii Curie, orice material feromagnetic are o comportare paramagnetică [2].

3.3 Curba de histerezis magnetic și mărimi ce se determina de pe aceasta

Dacă unui material feromagnetic i se aplică un câmp magnetic extern H , structura de domenii magnetice se ordonează, îi crește magnetizarea, până în punctul în care întreg materialul devine un singur domeniu magnetic, cu vectorul de magnetizare paralel cu câmpul magnetic aplicat. Aici se atinge practic magnetizarea la saturație M_s , iar câmpul se numește câmp de saturație, H_s . Curba care pornește din origine și atinge valoarea de saturație a unui material feromagnetic se numește curbă de primă magnetizare. Din acest punct, la oprirea acțiunii câmpului H , magnetizarea nu revine în poziția inițială, ci ajunge în alt punct, numit magnetizare remanentă notată cu M_r . Pentru readucerea magnetizării la valoarea zero este nevoie de un câmp magnetic invers câmpului aplicat inițial, numit câmp coercitiv H_c și este una din cele mai importante caracteristici ale unui material magnetic. Creșterea în continuare a câmpului aplicat invers duce la o magnetizare în sens opus, egală în modul cu cea inițială, iar inversarea sensului și creșterea câmpului duce la atingerea saturației, astfel încheindu-se ciclul de histerezis magnetic.

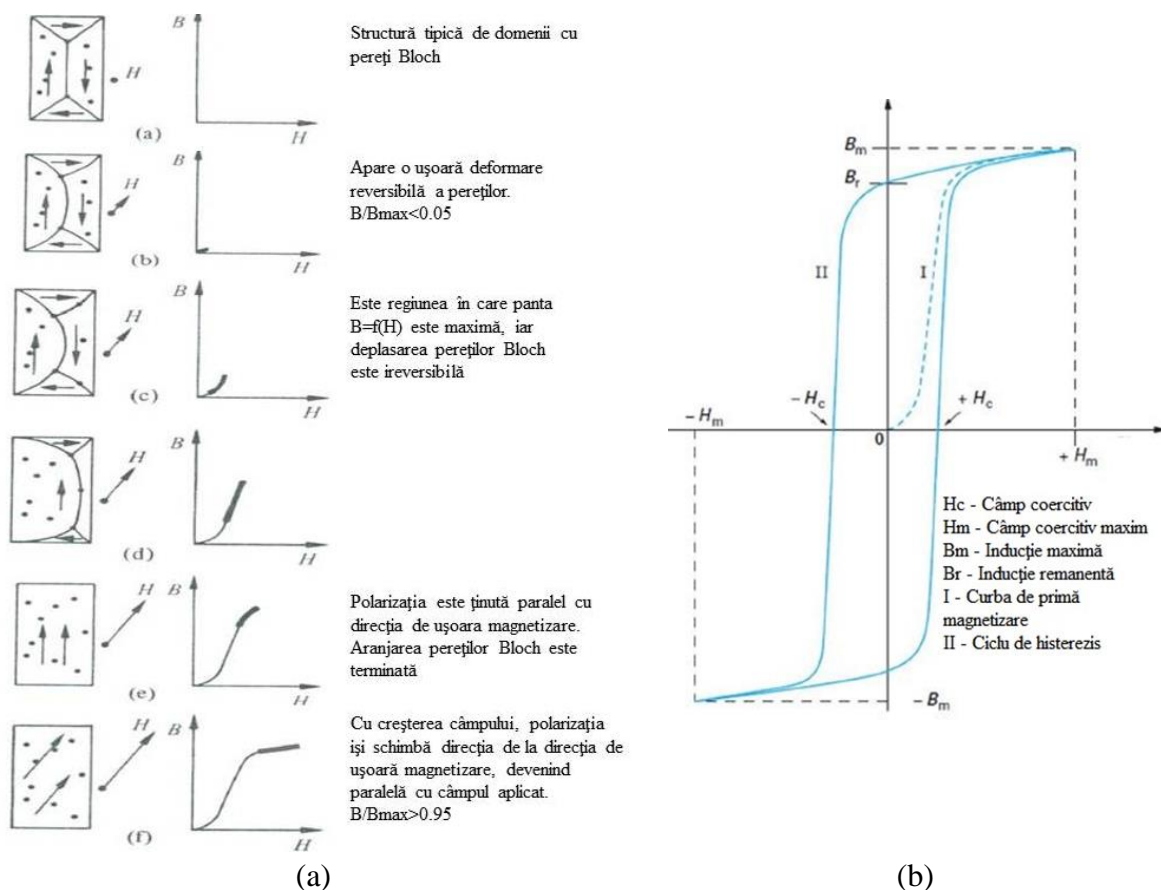


Figura 4. Deplasarea pereților Bloch într-un cristal în timpul realizării curbei de primă magnetizare (a) și ciclul de histerezis al unui material feromagnetic (b) [3, 4].

Materialele magnetice se pot clasifica după aplicațiile lor în:

- materiale magnetice moi;
- materiale magnetice dure (magneți sau magneți permanenți).

Oțelurile cu conținut scăzut de carbon se încadrează în grupa materialelor magnetice moi, în timp ce oțelurile cu conținut mai ridicat de carbon se încadrează în grupa materialelor dure sau semi-dure.

Materialele magnetice moi au permeabilitate magnetică mare, câmp coercitiv și pierderi energetice mici. Cele două mărimi, câmpul coercitiv și permeabilitatea magnetică, sunt invers proporționale. Materialele magnetice moi au rolul de a crea un flux magnetic maxim, folosind un câmp extern mic. Materialele magnetice dure (magneții permanenți) au inducție remanentă și câmp coercitiv mari. Acestea sunt o sursă de flux magnetic stabil în raport cu câmpurile externe și temperatura.

Având în vedere că această tehnică presupune magnetizarea materialului feromagnetic și utilizarea unor particule feromagnetice pentru punerea în evidență a defectelor din material, în cele ce urmează vor fi amintite cele mai importante caracteristici magnetice a unui material, caracteristici ce pot fi determinate de pe ciclul de histerezis magnetic. Momentele atomice prezente într-o substanță se adună vectorial și au un anumit efect rezultat. Acest efect se numește magnetizarea M, și este definită ca suma vectorială a momentelor magnetice, pe unitatea de volum V conform relației de mai jos [1, 5]:

$$M = \frac{\sum \mu_{at}}{V} \quad (2)$$

Magnetizarea la saturație M_s și inducția la saturație B_s , se definesc de pe curbele de histerezis corespunzătoare și reprezintă valorile la care tind aceste mărimi, când momentele magnetice atomice sunt aliniate paralel cu câmpul extern aplicat [1, 5].

Magnetizarea remanentă M_r și inducția remanentă B_r , se definesc de pe curbele de histerezis corespunzătoare și reprezintă valorile acestor mărimi, atunci când câmpul magnetic extern este înlăturat [1, 5].

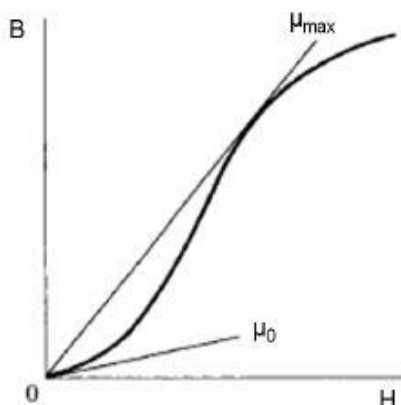


Figura 5. Curba de primă magnetizare. Modul de definire a permeabilității inițiale și maxime.

Permeabilitatea magnetică μ caracterizează răspunsul materialului la aplicarea unui câmp magnetic extern și arată ușurința cu care acesta poate fi magnetizat. Aceasta se determină de pe curba de primă magnetizare și este dată de raportul dintre inducția B și intensitatea câmpului aplicat H, în orice punct de pe curba de prima magnetizare. Există mai multe tipuri

de permeabilitate ce se pot defini pe curba de primă magnetizare a unui material dar dintre acestea, doar două sunt de interes pentru subiectul abordat:

- *permeabilitatea inițială* μ_i reprezintă panta în origine la curba de primă magnetizare;
- *permeabilitatea maximă* μ_{max} se definește ca tangenta de pantă maximă dusă din origine la curba de primă magnetizare.

La utilizarea materialelor magnetice moi în curent alternativ apar curenți turbionari care conduc la o scădere abruptă a permeabilității la o anumită frecvență, numită *frecvență de limitare*. Aceasta este definită ca fiind frecvența la care componenta reală a permeabilității magnetice complexe scade la 2/3 din valoarea inițială [1].

Câmpul coercitiv H_c reprezintă valoarea câmpului magnetic extern, care aduce corpul în stare complet demagnetizată fiind de sens invers câmpului care a produs magnetizarea și se poate defini numai de pe curba de histerezis [1].

Temperatura Curie este temperatura limită la care un material magnetizat se demagnetizează datorită agitației termice. Aceasta este temperatura caracteristică materialelor feromagnetice, deasupra căreia acestea devin paramagnetice.

3.4 Principiul de bază a controlului nedistructiv cu pulberi magnetice

Să considerăm un magnet permanent precum cel prezentat în figura 6a. Dacă peste acesta vom presară o pulbere feromagnetică (de exemplu pilitură de fier) vom observa că particulele vor fi atrase, în mare măsură, doar de capetele magnetului (polii magnetului). Putem trage concluzia că magnetul atrage pulberile doar în locul în care liniile de câmp magnetic ies sau intră în magnet. Dacă un magnet precum cel prezentat în figura 5a este rupt în două sau mai multe părți, indiferent de lungimea bucăților, fiecare bucată va avea în mod instantaneu câte un pol nord și un pol sud. Orice magnet are doi poli, un pol nord (N) și un pol sud (S). Se consideră, prin convenție, că sensul liniilor de câmp magnetic în interiorul magnetului este de la sud la nord, iar în afara magnetului sensul este de la nord la sud. În cazul în care magnetul este de formă circulară, polii acestuia sunt în contact și toate liniile de câmp magnetic vor fi cuprinse în interiorul magnetului.



(a)



(b)

Figura 6. Aglomerarea pulberii feromagnetice în zona polilor unui magnet permanent [6].

Dacă într-un magnet se va realiza o creștătură precum cea prezentată în figura 6b, în zona creștăturii se va forma o nouă pereche de poli nord și sud. Se poate observa că pulbera magnetică este atrasă atât de polii situați la capetele magnetului cât și de polii creați de creștătură.

În cazul în care liniile de câmp magnetic întâlnesc un defect (precum creștătură din magnet) acestea vor încerca să ocolească defectul, deoarece acesta este caracterizat de o permeabilitate magnetică mult mai mică decât magnetul. Permeabilitatea relativă a aerului este aproximativ 1 în timp ce permeabilitatea materialelor magnetice moi se încadrează în general în domeniul $10^2 - 10^5$. Traversarea defectului de către liniile de câmp magnetic va conduce la dispersarea acestora, deoarece aerul din defect nu poate suporta o densitate la fel de mare de linii de câmp precum materialul magnetic. O parte din liniile de câmp vor ieși în afara materialului în zona în care există un defect, formând ceea ce se cheamă câmp de scăpări sau câmp de dispersie. Când un material feromagnetic este magnetizat, comportamentul acestuia este similar cu al unui magnet. Existența unei fisuri de suprafață, sau în imediata apropiere a suprafeței materialului magnetizat, va conduce la apariția unui câmp de dispersie în zona fisurii. Câmpul magnetic de dispersie este neomogen și are o energie mare. Minimizarea energiei acestuia se poate realiza prin atragerea unor particule feromagnetice (pulberi magnetice), ce se depun în lungul liniilor de câmp magnetic, creând un fel de punte pentru liniile de câmp magnetic așa cum se poate observa în figura 7.

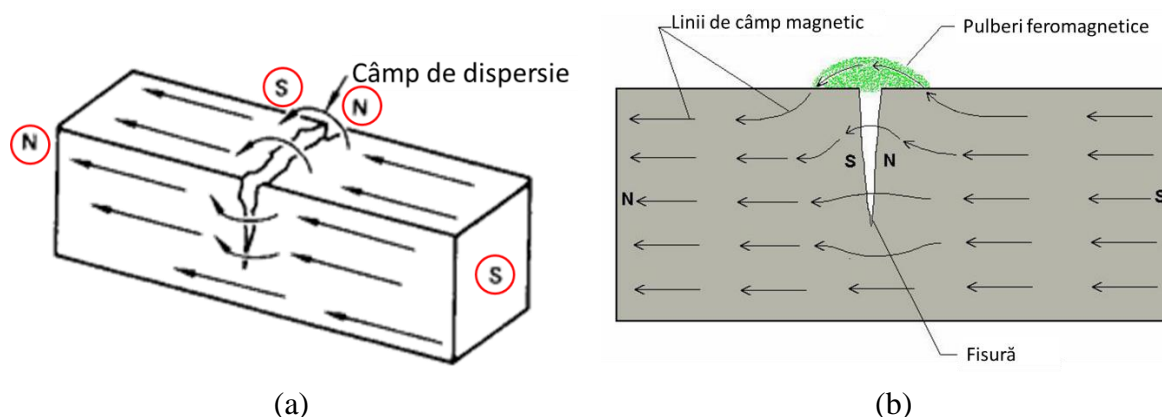


Figura 7. Formarea câmpului de dispersie (a) și obținerea indicației de defect cu ajutorul pulberilor magnetice (b) [7].

Prezența unui defect va conduce la dispersia liniilor de câmp magnetic, conducând la obținerea unei indicații ce va fi mult mai mare decât dimensiunea efectivă a defectului.

Apariția câmpului de dispersie are la baza următoarele proprietăți ale liniilor de câmp magnetic [8]:

- închiderea liniilor de câmp între cei doi poli ai unui magnet se va face pe traseul de minimă rezistență;
- liniile de câmp magnetic nu se intersectează între ele;
- toate liniile de câmp ale unui magnet au aceeași intensitate;
- densitatea liniilor de câmp scade odată cu creșterea distanței față de poli;

- densitatea liniilor de câmp scade atunci când acestea trec dintr-un mediu cu permeabilitate magnetică mare într-un mediu cu permeabilitate mai mică;
- sensul liniilor de câmp magnetic în interiorul magnetului este de la sud la nord iar în afara magnetului sensul este de la nord la sud.

Orientarea defectului în raport cu liniile de câmp magnetic influențează în mod hotărâtor mărimea câmpului de dispersie. Câmpul de dispersie este maxim în cazul în care defectul este perpendicular pe direcția câmpului aplicat (cazul 1 și 2 din figura 8) și este minim în cazul în care defectul este paralel cu direcția liniilor de câmp (cazul 4 din figura 8).

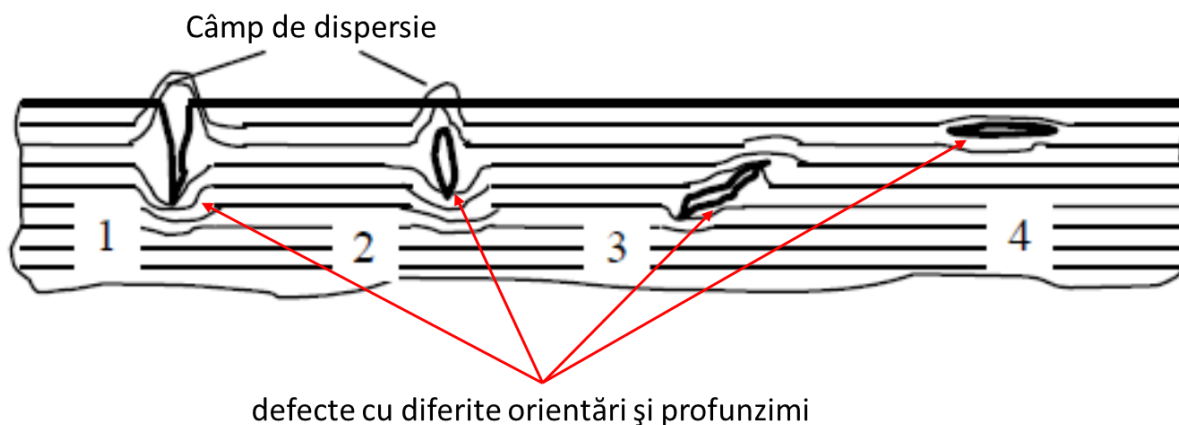


Figura 8. Influența orientării defectului în raport cu direcția liniilor de câmp magnetic asupra câmpului de dispersie.

De asemenea, poziția defectului în raport cu suprafața piesei (profunzimea acestuia) este extrem de importantă. O fisură deschisă, sau un defect din imediata apropiere a suprafeței, va produce un câmp de dispersie important (cazul 1 și 2 din figura 8), în timp ce o discontinuitate de profunzime poate produce un câmp de dispersie foarte slab sau nul, în funcție de distanța la care aceasta se află față de suprafața materialului (cazul 3 din figura 8). Luând în considerare aceste aspecte, reiese clar necesitatea ca magnetizarea probei să fie făcută în așa fel încât liniile de câmp magnetic să intersecteze defectele de o manieră cât mai favorabilă (în cazul ideal, liniile de câmp sunt perpendiculare pe defect).

Etapele generale ale unui control cu pulberi magnetice sunt prezentate în schema din figura 9.

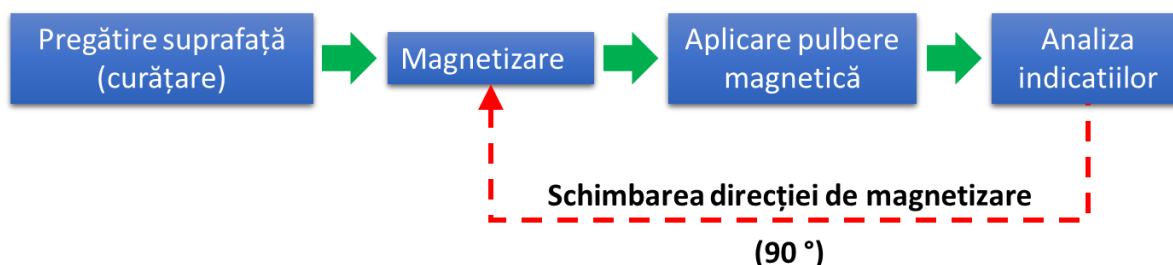


Figura 9. Etapele generale ale unui control cu pulberi magnetice.

Schimbarea direcției de magnetizare a probei constă în magnetizarea probei la un unghi de 90° față de prima magnetizare, în așa fel încât, indiferent de orientarea defectului, acesta va produce un câmp de dispersie detectabil, dacă defectul nu se află la o adâncime prea mare.

3.5 Pregătirea suprafeței pentru examinare

Pregătirea suprafeței în vederea realizării unui control cu pulberi magnetice este o operație importantă, dar care nu impune un grad de strictețe similar cu cel pentru controlul cu lichide penetrante. Această etapă este, mai degrabă, o curățare sumară a suprafeței care vizează îndepărtarea pe cât posibil a contaminanților precum: praf, șpan, amestec de formare, substanțe grase (ulei, vaselină) etc. Neîndepărtarea acestora de pe suprafață va conduce la obținerea unor indicații false. Trebuie menționat că eventualele straturi de vopsea, lacuri de protecție sau straturi de protecție (zincare, cromare, cadmiere, etc.) nu este necesar să fie înlăturate (ele neinfluențând sensibilitatea metodei). Acestea vor fi înlăturate doar în următoarele cazuri [9]:

- dacă magnetizarea probei se face cu electrozi de contact. Vopselele fiind izolatoare electric îngreunează contactul dintre electrod și probă, făcând dificilă sau imposibilă magnetizarea probei;
- dacă grosimea straturilor de protecție depășește 20 – 30 μm . Dacă grosimea stratului este mai mare, indicația defectului devine din ce în ce mai mică, făcând dificilă etapa de analiză a indicațiilor.

În cazul în care se folosesc pulberi magnetice necolorate, pentru obținerea unui contrast corespunzător între indicație și defect, suprafața examinată se recomandă a fi vopsită cu o vopsea albă pe baza de oxid de titan sau oxid de magneziu. Rugozitatea suprafeței influențează în mod direct sensibilitatea metodei. Se verifică dacă rugozitatea îndeplinește condiția ca $R_a \leq 16 \mu\text{m}$, condiție necesară și suficientă pentru controale de rutină [10].

3.6 Metode de magnetizare a pieselor pentru controlului cu pulberi magnetice

Trebuie menționat faptul că nu numai magneții permanenți sunt surse de câmp magnetic. Trecerea unui curent electric printr-un conductor va genera în jurul acestuia linii de câmp magnetic circulare, intensitatea câmpului creat fiind proporțională cu intensitatea curentului ce trece prin conductor. Dacă magneții permanenți sunt surse permanente de câmp magnetic, un conductor va genera câmp magnetic doar atât timp cât este parcurs de curent electric. Un mod foarte convenabil de a produce câmp magnetic este prin trecerea unui curent electric printr-o bobina de cupru. Câmpul magnetic care înconjoară fiecare spiră se va combina cu câmpul magnetic creat de spirele învecinate și va crea un câmp magnetic concentrat în centrul bobinei. Liniile de câmp vor trece de-a lungul axei bobinei și se vor închide prin exteriorul bobinei așa cum este arătat în figura 10a. În practică, în controlul nedistructiv cu pulberi magnetice, se folosește aproape în exclusivitate curentul electric ca sursă de câmp magnetic pentru magnetizarea probei.

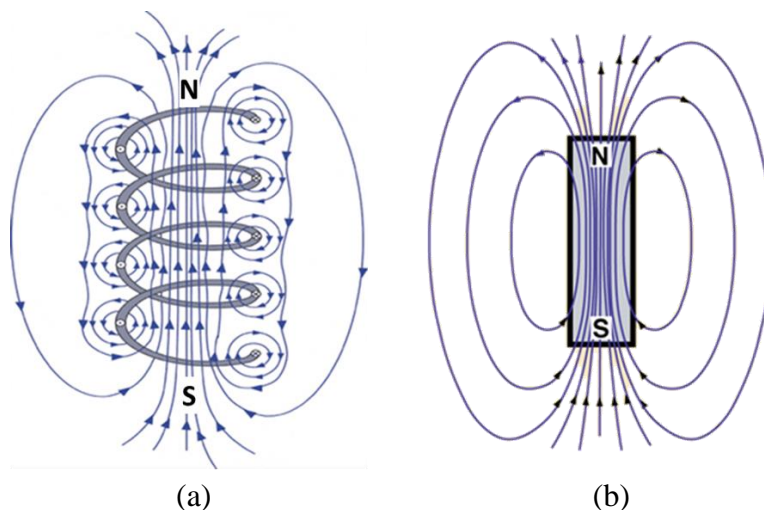


Figura 10. Câmpul magnetic creat de o bobină respectiv de un magnet permanent [8].

Așa cum am remarcat anterior, obținerea unor rezultate bune la controlul nedistructiv cu pulberi magnetice este condiționată de modul în care se face magnetizarea probei, mai exact de direcția liniilor de câmp magnetic în raport cu poziția și în special orientarea defectului. Din punct de vedere al orientării liniilor de câmp magnetic în raport cu o axa de simetrie a piesei supusa controlului (a piesei magnetizate), magnetizarea probei poate fi de două feluri:

- magnetizare longitudinală sau polară, când direcția câmpului magnetic aplicat este paralelă cu axa longitudinală a piesei;
- magnetizare transversală sau circulară, când câmpul magnetic urmărește conturul periferic al piesei fiind perpendicular pe axa longitudinală a piesei.

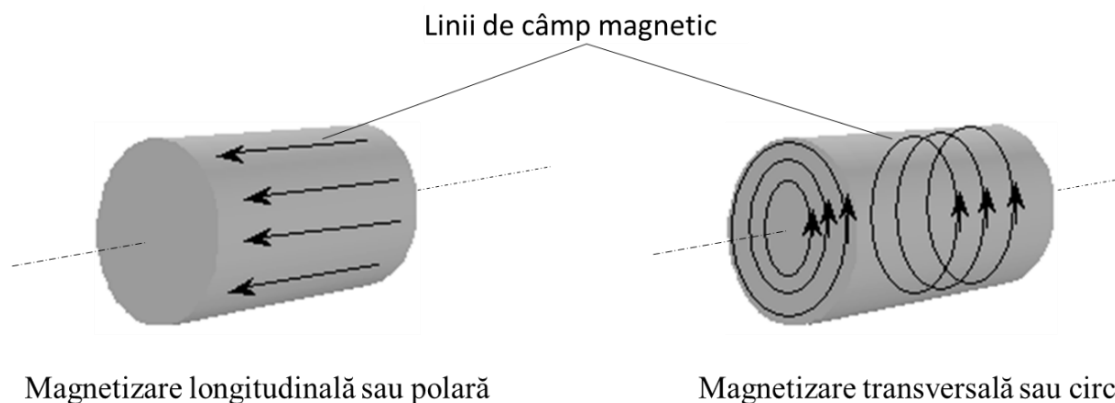


Figura 11. Orientarea liniilor de câmp magnetic în cazul magnetizării longitudinale și a magnetizării circulare [9].

În afară de magnetizarea longitudinală și magnetizarea transversală, mai există și magnetizarea mixtă, când se aplică simultan o magnetizare longitudinală și una transversală.

3.6.1 Metode de magnetizare longitudinală sau polară

În cadrul acestui tip de magnetizare, operatorul trebuie să se asigure că liniile de câmp magnetic sunt orientate paralel cu axa longitudinală a piesei. Obținerea unui câmp magnetic longitudinal în proba examinată se poate face cu ajutorul unui jug magnetic (electromagnet), a unui magnet permanent în formă de potcoavă sau a unei bobine de magnetizare (solenoid).

Utilizarea magneților permanenți ca sursă de câmp magnetic este o soluție ieftină, dar care nu permite controlul intensității câmpului magnetic aplicat. De asemenea, amplasarea și înlăturarea magnetului pe și de pe suprafața investigată ridică probleme datorită forței de atracție exercitată de magnet care poate duce la distrugerea magnetului datorită șocurilor mecanice. Cu toate acestea, magneții permanenți pot fi folosiți pentru examinări subacvatice sau în medii explozive, unde folosirea unor electromagneți este imposibilă sau extrem de periculoasă.

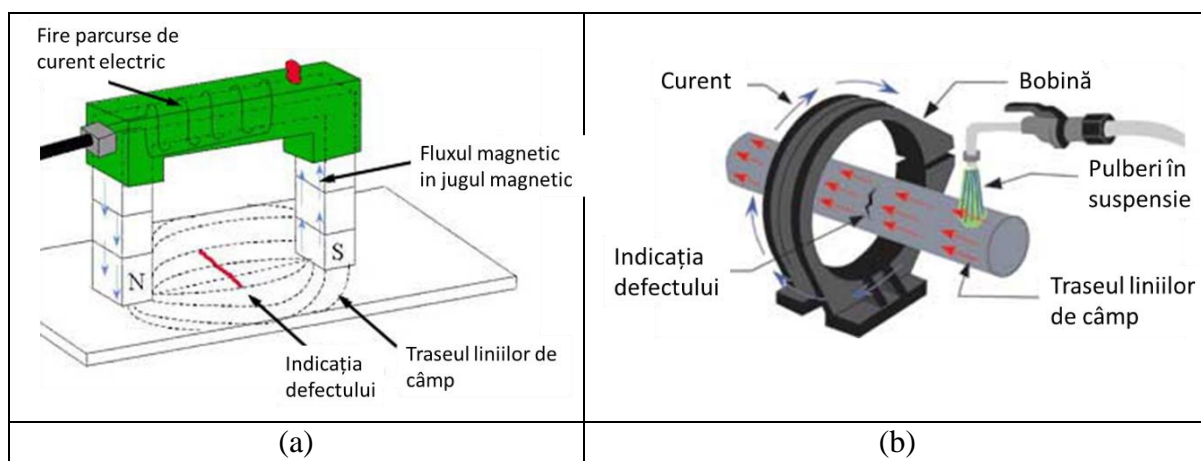


Figura 12. Producerea câmpului magnetic longitudinal în proba analizată cu ajutorul unui jug electromagnetic (a) și a unei bobine (b) [7, 8].

Aspectele negative ale magneților permanenți sunt înlăturate atunci când se folosește un jug electromagnetic sau o bobină. Trecerea curentului (curent alternativ sau continuu) prin bobina electromagnetului va produce un câmp magnetic care se va induce în piesele polare ale jugului (realizate din fier) și se va închide prin probă. Intensitatea câmpului magnetic este dependentă de intensitatea curentului ce trece prin bobina jugului electromagnetic. Jugul electromagnetic poate avea piesele polare fixe sau mobile.

Magnetizarea longitudinală cu ajutorul unei bobine se pretează pentru piese lungi (figura 12b). Bobina poate fi formată din câteva spire realizate dintr-un conductor cu secțiune mare sau dintr-o singură spira de secțiune mare, caz în care bobina poartă numele de inel de magnetizare. În ambele situații se obține un câmp magnetic care în interiorul piesei analizate are liniile orientate paralel cu axa bobinei. Trebuie menționat că, câmpul magnetic indus de o bobina se întinde la aproximativ 150 - 200 mm dincolo de capetele bobinei. Din acest motiv, examinarea unor piese cu lungimi mai mari se realizează fie prin deplasarea acestora de-a lungul axului bobinei (inelului de magnetizare), fie prin deplasarea bobinei de-a lungul probei. În cazul examinării unor piese cu geometrie complexă, bobina poate fi înlocuită cu un cablu flexibil prin care trece un curent de intensitate mare care se înfășoară în jurul piesei [11].

3.6.2 Metode de magnetizare transversală sau circulară

Obținerea unui câmp magnetic transversal sau circular într-o probă se poate realiza fie prin trecerea unui curent electric prin proba examinată, fie prin trecerea unui curent electric printr-un conductor care se află în interiorul piesei examinate (în cazul pieselor tubulare). Trecerea unui curent electric printr-un conductor va conduce la apariția în jurul acestuia a unui câmp magnetic circular constant pe toată lungimea conductorului (figura 13a). Acest câmp persistă atât timp cât conductorul este străbătut de curent electric, intensitatea lui scade cu distanța față de conductor iar sensul liniilor de câmp poate fi determinat cu ajutorul regulii mâinii drepte (figura 13b).

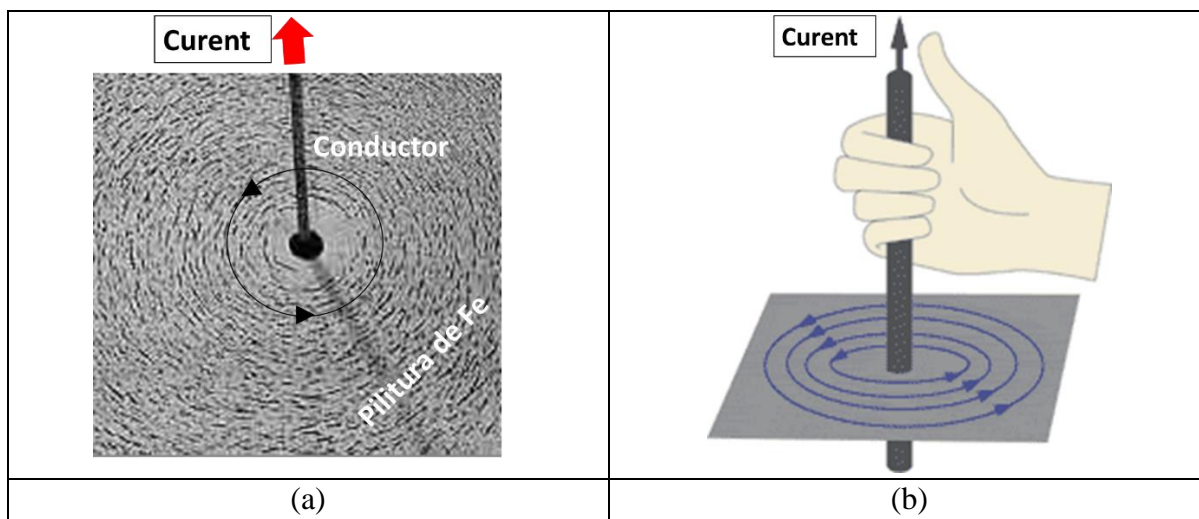


Figura 13. Câmpul magnetic format de un conductor străbătut de un curent electric (a) și determinarea sensului liniilor de câmp cu ajutorul regulii mâinii drepte (b) [8].

În figura 14 sunt prezentate două moduri de a obține o magnetizare circulară într-o piesă prin trecerea unui curent electric prin aceasta. În primul montaj (figura 14a), piesa este fixată între două capete/plăci de contact confecționate din plumb sau țesătura de cupru. Piesa trebuie fixată cât mai bine, în așa fel încât la trecerea curentului prin montaj să nu aibă loc supraîncălzirea piesei sau deteriorări ale suprafeței de contact, ca urmare a apariției descărcărilor electrice. Ca urmare a trecerii curentului prin piesă, în interiorul acesteia și în jurul acesteia se va forma un câmp magnetic circular. Intensitatea câmpului magnetic creat este proporțională cu intensitatea curentului ce străbate piesa examinată. În al doilea montaj, (figura 14b) trecerea curentului prin piesa examinată se face cu ajutorul unor electrozi de contact sau a unor cleme atașate de aceasta. Curentul electric trece prin probă în zona dintre cei doi electrozi, conducând la formarea unui câmp magnetic circular în jurul traseului curentului. Și în acest caz, trebuie luate măsuri în așa fel încât la contactul dintre electrozi și suprafața analizată să nu aibă loc fenomene de supraîncălzire sau descărcări electrice. Prin această metodă se pot controla piese de dimensiuni mari, trecând curentul doar prin porțiunile de interes din aceasta, sau piese cu geometrie complexă.

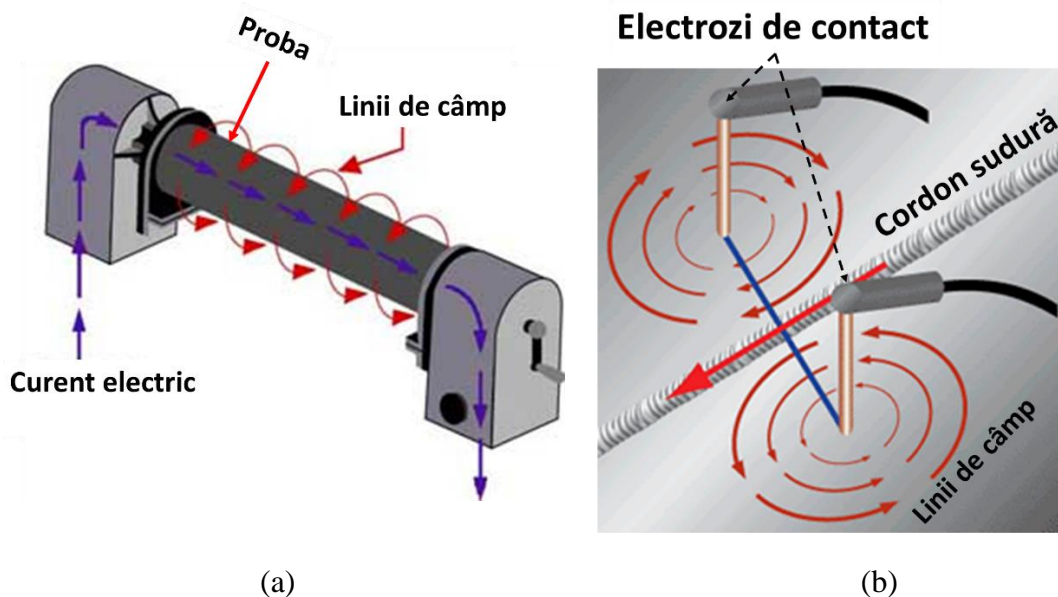


Figura 14. Formarea liniilor de câmp magnetic circular prin trecerea unui curent electric prin piesa examinată [8].

O altă modalitate de a produce linii circulare de câmp magnetic în proba examinată este aceea ce a trece un curent electric printr-un cablu sau o bară de cupru ce se află în centrul piesei (figura 15). Curentul ce străbate conductorul va genera linii de câmp magnetic concentrice ce se vor induce în piesa examinată dinspre interiorul acesteia spre exterior. Această metodă se pretează foarte bine controlului pieselor tubulare sau inelare.

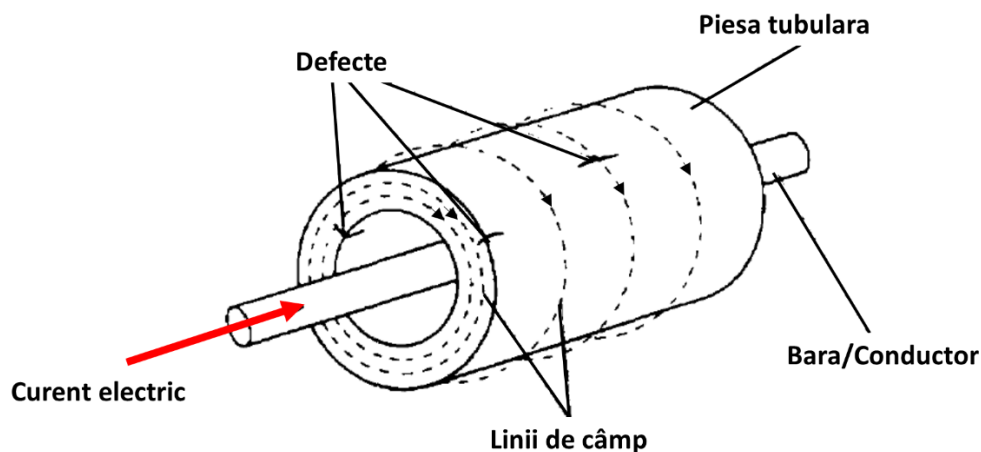


Figura 15. Magnetizarea circulară a unei piese tubulare cu ajutorul unui conductor străbătut de un curent electric [12].

Având în vedere că, de-a lungul conductorului, câmpul este omogen, piesa poate fi examinată pe întreaga ei lungime fără a fi nevoie să se deplaseze. De asemenea, în cazul unor piese cu lungime mică, este posibilă examinarea mai multor piese simultan. Această metodă elimină riscul deteriorării suprafeței piesei prin supraîncălzire sau descărcări electrice, deoarece nu presupune existența unui contact fizic între piesa examinată și conductorul de curent electric.

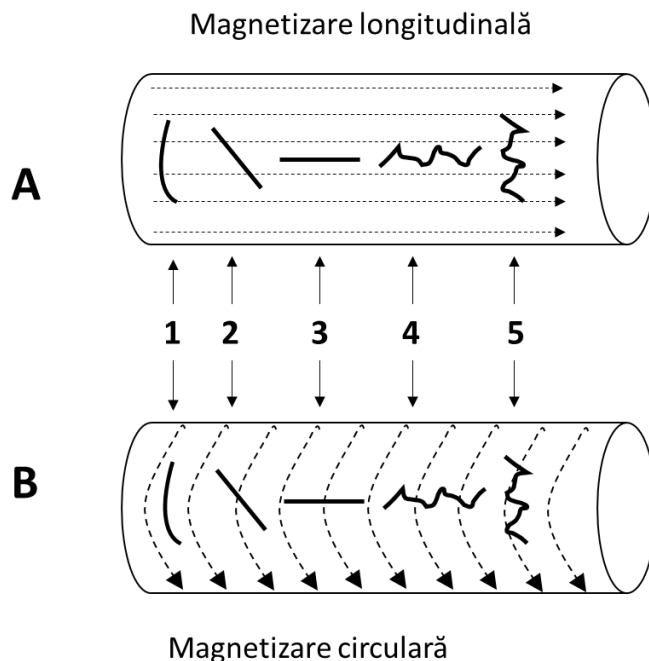


Figura 16. Detecția unor fisuri în funcție de orientarea lor și de tipul de magnetizare folosit.

Orientarea liniilor de câmp în probă (longitudinal sau transversal) este un factor hotărâtor în detecția defectelor de suprafață sau din imediata apropiere a suprafeței. Este important să avem posibilitatea de a magnetiza o probă atât longitudinal cât și transversal, deoarece probabilitatea de a detecta un defect este maxima atunci când liniile de câmp sunt perpendiculare pe axa principală a defectului (liniile sunt perpendiculare pe lungimea defectului). Această orientare creează cea mai mare perturbare a liniilor de câmp în interiorul probei și, prin urmare, cel mai intens câmp de dispersie în exteriorul probei. Dacă liniile de câmp sunt paralele cu axa defectului, perturbarea liniilor de câmp va fi minimă și, prin urmare, câmpul de dispersie poate fi nedetectabil în afara probei. Experimental s-a stabilit că dacă defectul se află orientat la un unghi cuprins între 45° și 90° față de liniile de câmp magnetic, se va produce un câmp de dispersie suficient încât să creeze o indicație care să pună în evidență prezența defectului. Având în vedere acestea, putem trage concluzia că, dacă asupra unei probe se realizează două procese de magnetizare, în așa fel încât direcțiile liniilor de câmp induse de cele două magnetizări să fie perpendiculare între ele, șansele ca un defect să scape neobservat sunt minime. Atunci când un câmp longitudinal este aplicat unei probe (vezi figura 16 cazul A), indicații certe vor fi obținute de la defectele 1, 2, 5 și posibil 4. În cazul aplicării unui câmp circular (transversal) se vor obține indicații certe de la defectele 2, 3, 4 și posibil 5. În cazul defectelor 4 și 5, datorită geometriei acestora (fisuri în zig-zag), există posibilitatea ca acestea să producă indicații care să sugereze prezența unui defect indiferent de tipul de magnetizare folosit.

Sensibilitatea metodei de control nedistructiv cu pulberi magnetice este o noțiune relativă. Aprecierea sensibilității metodei se poate face luând în considerație deschiderea celui mai mic defect care produce o indicație relevantă, precum și adâncimea maximă la care se poate detecta un defect de o anumită dimensiune. Experimental s-a demonstrat că în condiții optime (magnetizare corespunzătoare, dispunerea defectului relativ la direcția liniilor de câmp, etc.) se pot detecta defecte a căror deschidere este de $1 - 2 \mu\text{m}$ [9]. În ceea ce privește adâncimea

la care se află defectul în raport cu suprafața piesei, se consideră că defecte cu întindere de ordinul câtorva milimetri vor produce indicații relevante de la profunzimea de 3 - 4 mm. În condiții optime această adâncime poate să crească.

3.7 Alegerea tipului curentului electric care produce câmpul magnetizant

Așa cum am observat în paragraful anterior, curentul electric este folosit, cel mai adesea, pentru a crea câmpul magnetic ce magnetizează proba supusă investigației. Pe lângă orientarea liniilor de câmp în raport cu proba, felul curentului influențează în mod direct sensibilitatea unei examinări. În principiu se pot folosi trei tipuri distincte de curent electric: curent continuu, curent alternativ și curent pulsatoriu.

3.7.1 Curentul continuu

Curentul continuu poate fi produs prin redresarea bialternanță a curentului monofazat sau folosind o simplă baterie. Convențional s-a stabilit că sensul curentului continuu într-un circuit este de la plus (borna pozitivă) la minus (borna negativă). Folosirea acestui tip de curent prezintă avantajul de a crea un câmp magnetic care pătrunde pe o adâncime mare în probă, efectul pelicular fiind practic absent. Din acest motiv folosirea curentului continuu este indicată atunci când se dorește detectarea defectelor mai adânci (mai îndepărtate de suprafața probei). Pe de altă parte, particulele magnetice de pe suprafața examinată vor fi inerte (nu vor vibra precum în cazul curentului alternativ), motiv pentru care câmpul de dispersie creat de un defect trebuie să fie suficient de mare pentru a conduce la aglomerarea pulberilor. Având în vedere că intensitatea câmpului de scăpări este influențată în mod direct și de dimensiunea defectului, rezultă că defectele de dimensiuni foarte mici vor fi dificil sau chiar imposibil de pus în evidență, deoarece acestea vor genera un câmp de dispersie de mică intensitate.

3.7.2 Curentul alternativ

Curentul alternativ este caracterizat de faptul că își schimbă sensul (polaritatea) în funcție de frecvență. De exemplu, un curent alternativ cu o frecvență de 50 Hz își va schimba sensul de 50 de ori într-o secundă. Avantajul folosirii acestui curent constă în mobilitatea sporită a particulelor magnetice aflate pe suprafața examinată. Mobilitatea sporită se explică prin schimbarea sensului curentului în funcție de frecvență, schimbare care va induce o mișcare de vibrație a particulelor, ele ne mai fiind inerte pe suprafața examinată precum în cazul curentului continuu. Datorită mobilității sporite a particulelor magnetice, este posibilă obținerea unei indicații chiar și în cazul defectelor de dimensiuni mici. Un mare dezavantaj al folosirii acestui tip de curent este acela că, în materiale feromagnetice, câmpul creat este limitat la suprafața materialului datorită efectului pelicular. Efectul pelicular este dat de curenții turbionari induși de curentul electric alternativ. Aceștia vor crea un câmp magnetic de sens opus câmpului magnetic creat de curentul alternativ reducând fluxul magnetic în interiorul probei. Cu cât frecvența curentului alternativ este mai mare, cu atât adâncimea de penetrare a câmpului magnetic este mai mică. De exemplu, adâncimea de penetrare într-un conductor de cupru

străbătut de un curent alternativ cu o frecvență de 60 Hz este de doar 8,5 mm indiferent de secțiunea conductorului.

3.7.3 Curentul pulsatoriu

Curentul pulsatoriu este obținut prin redresarea curentului alternativ, redresare care poate fi monoalternanță sau bialternanță în cazul curentului monofazat. Redresarea monoalternanță conduce la obținerea unui curent caracterizat de aceea că o semialternanță (de obicei semialternanța negativă) este eliminată. La redresarea bialternanță, în loc ca semialternanța negativă să fie eliminată, aceasta este inversată obținându-se un semnal precum cel prezentat în figura 17.

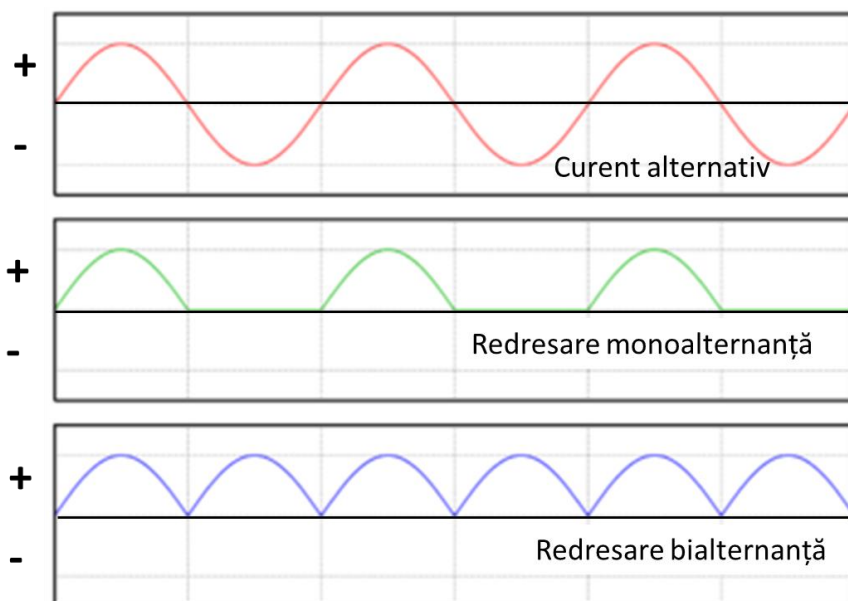


Figura 17. Forma curentului alternativ înainte și după redresarea mono sau bialternanță.

Acest tip de curent combină punctele forte ale curentului continuu și alternativ astfel:

- mobilitatea particulelor de pulbere de pe suprafața examinată este menținută, cu toate că vibrația acestora este mai scăzută decât în cazul curentului alternativ;
- efectul pelicular este mai scăzut decât în cazul curentului alternativ, adâncimea de pătrundere a câmpului magnetic fiind mai mare, permite detectarea defectelor aflate mai în profunzime. Cu toate acestea, adâncimea de pătrundere a câmpului magnetic creat de curentul pulsatoriu este mai mică decât în cazul curentului continuu.

3.8 Distribuția câmpului magnetic în piese

Atunci când o piesă cu lungimea considerabilă este magnetizată cu ajutorul unui solenoid, este posibilă magnetizarea corespunzătoare doar a unei porțiuni a piesei. Numai materialul cuprins între spirele solenoidului și aproximativ aceeași lungime în stânga și dreapta solenoidului va fi magnetizat corespunzător. Această lungime este notată cu x în figura 18. La

o anumită distanță de solenoid, liniile de câmp magnetic nu vor mai fi orientate longitudinal față de probă, ele ieșind din probă printr-un pol (polul N) și reintrând în proba prin polul S, ocolind solenoidul. Aceasta se întâmplă deoarece forța de magnetizare, sau densitatea de flux magnetic, se diminuează odată cu creșterea distanței față de solenoid. Ca urmare, forța de magnetizare poate fi suficient de puternică pentru a alinia domeniile magnetice ale materialului aflat doar în interiorul solenoid și în apropierea acestuia. Așadar, o piesă lungă trebuie să fie magnetizată și inspectată în mai multe locuri de-a lungul lungimii acesteia, astfel încât să se obțină o acoperire completă a lungimii acesteia. Aceasta se realizează prin deplasarea piesei în interiorul solenoidului sau deplasarea solenoidului de-a lungul piesei.

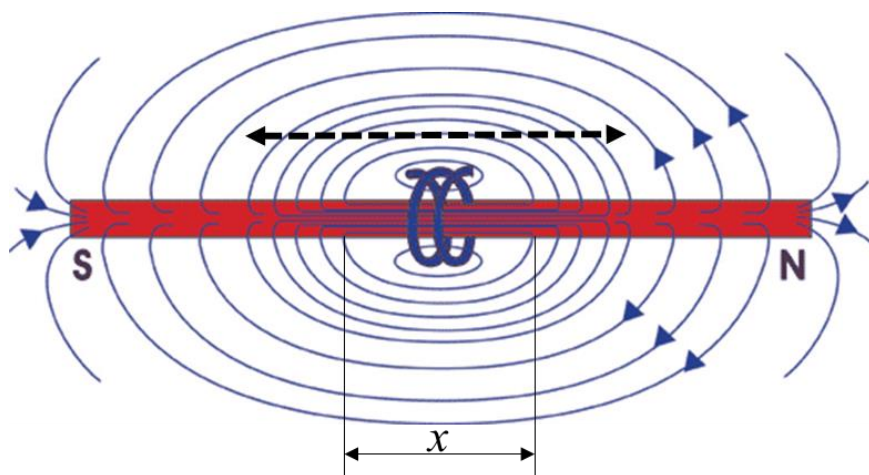


Figura 18. Distribuția câmpului magnetic într-o probă magnetizată longitudinal cu ajutorul unui solenoid [8].

În cazul magnetizării transversale (circulare) a unei piese, prin trecerea unui curent prin aceasta, câmpul magnetic obținut, în special intensitatea acestuia, variază foarte mult în funcție de felul materialului, forma piesei și felul curentului. Următoarele aspecte legate de distribuția și intensitatea câmpului magnetic într-o piesă cilindrică sunt considerate general valabile:

- intensitatea câmpului magnetic variază radial de la valoarea zero (în centrul piesei) la o valoare maximă (la suprafața piesei);
- intensitatea câmpului magnetic pe suprafața unei piese (la curent constant) scade dacă diametrul piesei crește.
- intensitatea câmpului magnetic în exteriorul probei este direct proporțională cu intensitatea curentului ce produce câmpul magnetic. În interiorul piesei, intensitatea câmpului magnetic depinde de intensitatea curentului aplicat, permeabilitatea magnetică a materialului piesei și de poziția de pe curba de prima magnetizare a materialului, poziție care arată raportul între inducție și câmpul magnetic aplicat (vezi figura 4a).
- intensitatea câmpului magnetic, în exteriorul piesei, scade cu creșterea distanței față de piesă.

În imaginile din figura 19, intensitatea câmpului magnetic este reprezentată în funcție de distanța de la centrul unui conductor cilindric, care poate fi asimilat cu o piesă cilindrică. Se poate observa că într-un conductor nemagnetic care transportă un curent continuu (figura 19a),

intensitatea câmpului magnetic intern crește de la zero în centrul acestuia la o valoare maximă la suprafața conductorului. Intensitatea câmpului în exteriorul conductorului scade cu creșterea distanței de la suprafața conductorului.

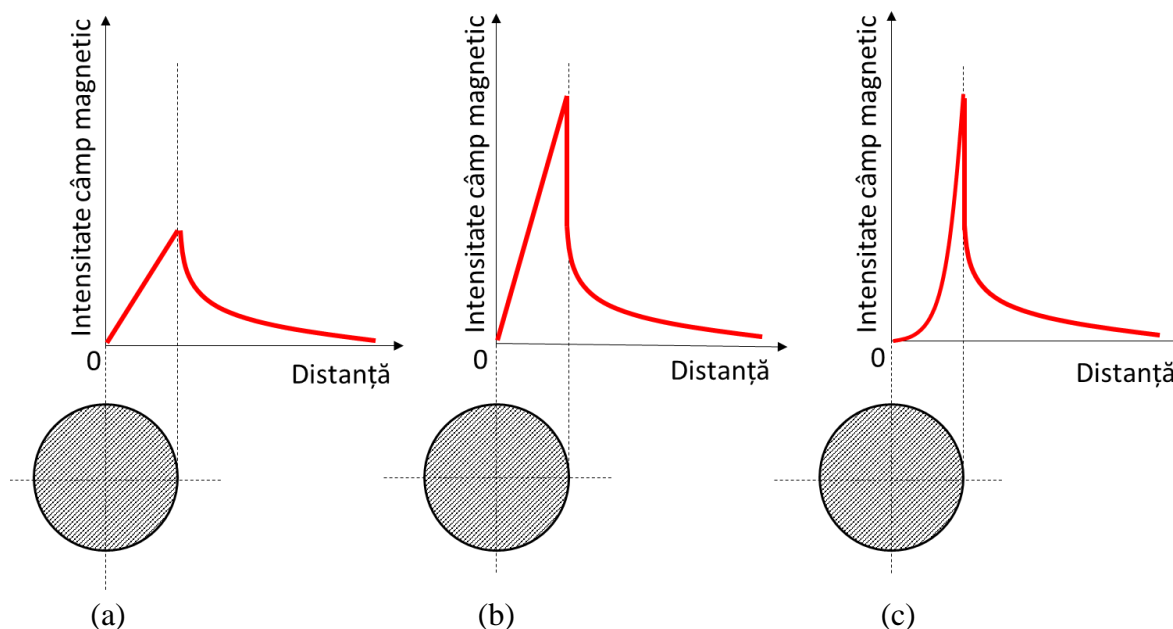


Figura 19. Intensitatea câmpului magnetic în funcție de distanța din centrul unui conductor nemagnetic (a), feromagnetic (b) parcurs de un curent continuu și feromagnetic parcurs de un curent alternativ (c) [adaptată după 11].

Când conductorul este dintr-un material feromagnetic (figura 19b), intensitatea câmpului magnetic din interiorul conductorului este mult mai mare decât în conductorul nemagnetic. Acest lucru se datorează permeabilității magnetice a materialului magnetic. Trebuie menționat faptul că, în ambele cazuri, intensitatea câmpului magnetic extern este aceeași (intensitatea curentului și diametrele celor două conductoare sunt identice). În cazul în care conductorul (piesa) este realizat din material feromagnetic, prin care trece un curent electric alternativ, se observă că marea majoritate a câmpului magnetic este concentrată în stratul exterior al probei. Acest lucru se datorează efectului pelicular dat de curenții turbionari induși în conductor de curentul alternativ.

În cazul magnetizării unor probe cilindrice tubulare prin trecerea unui curent prin acestea, profilul de variație a intensității câmpului magnetic este similar cu cel prezentat în cazul probelor cilindrice pline, cu mențiunea că, în interiorul cavității tubului câmpul magnetic este nul. Având în vedere aceasta, putem trage concluzia că, detectarea unor eventuale defecte prezente la suprafața sau în imediata apropiere a suprafeței peretelui interior al tubului este practic imposibilă sau cu probabilitate foarte mică.

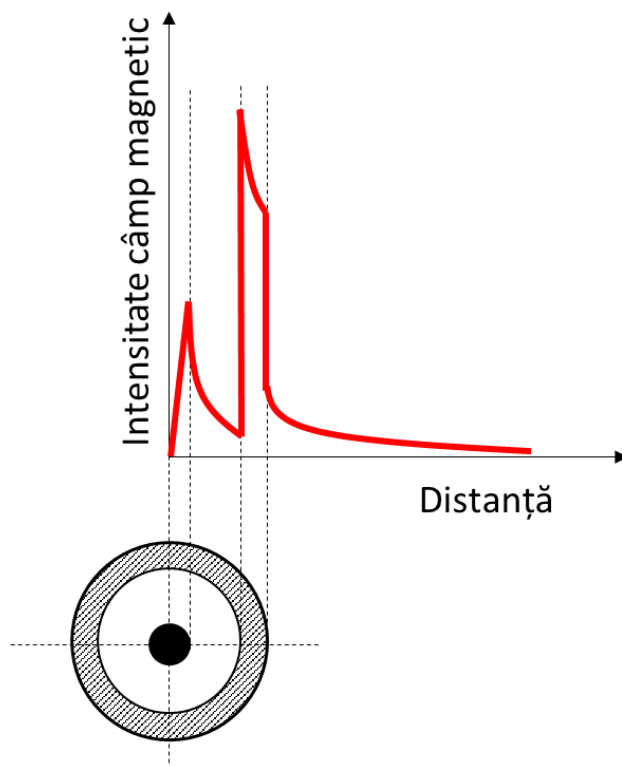


Figura 20. Intensitatea câmpului magnetic în funcție de distanță, pentru o piesă tubulară magnetizată cu un conductor parcurs de curent electric aflat în interiorul ei [adaptată după 11].

Un alt mod de a magnetiza o probă tubulară, care înlătură acest inconvenient, este folosind un conductor electric nemagnetic (bară de cupru), ce trece prin centrul tubului examinat. În figura 20 se poate observa că intensitatea câmpului magnetic pe suprafața interioară a tubului este foarte mare, iar pe suprafața exterioară a tubului este suficient de mare pentru a pune în evidență prezența unor defecte. Prin această metodă se poate examina atât suprafața interioară cât și cea exterioară a pieselor tubulare.

3.9 Pulberi și suspensii magnetice

Cu ajutorul pulberilor magnetice se pune în evidență prezența câmpurilor de dispersie create de defectele din probă. Pulberile magnetice folosite în cadrul acestei tehnici trebuie să îndeplinească o serie de condiții, în așa fel încât să se obțină indicații pentru defecte cât mai mici situate în profunzime, indicațiile obținute să iasă în evidență cât mai tare pe suprafața examinată. Pulberile folosite trebuie să fie dintr-un material magnetic moale, caracterizat de permeabilitate magnetică cât mai mare și magnetizare remanentă cât mai mică. Permeabilitatea magnetică mare le va permite să fie atrase ușor de câmpul de dispersie dat de un defect. Cu cât permeabilitatea magnetică a pulberilor este mai mare, cu atât se vor putea pune în evidență câmpuri de dispersie mai mici, date de defecte de dimensiuni mici sau defecte situate în profunzime. Magnetizarea remanentă trebuie să fie cât mai mică, deoarece trebuie ca pulberile să nu se lipească între ele din cauza unei magnetizări remanente importante. De asemenea, ele nu trebuie să se lipească, din aceeași cauză, de suprafața examinată, ele trebuind să se poată deplasa cât mai liber înspre zonele cu câmpuri magnetice de dispersie, pentru a forma indicația.

Din punct de vedere a granulației, pulberile pentru defectoscopie magnetică se clasifică în [10]:

- pulberi cu granulație fină (diametru mediu al pulberilor de 1 – 15 μm);
- pulberi cu granulație medie (diametru mediu al pulberilor de 30 – 100 μm);
- pulberi cu granulație grosolană (diametru mediu al pulberilor de 100 – 300 μm);

Pulberile folosite pot fi pulberi colorate sau nu. În cazul pulberilor colorate (roșu, galben, alb, verde sau fluorescente) pulberea magnetică este acoperită cu un strat de pigment colorat.

În funcție de materialul de bază a pulberii magnetice, care constituie suportul magnetic pentru pigmentii colorați, pulberile se clasifică astfel;

- pulberi de fier;
- pulberi ai unor oxizi ai fierului (oxizi magnetici moi);
- pulberi a unor aliaje feromagnetice moi.

Pulberile pentru controlul nedistructiv cu pulberi magnetice se produc în două variante:

- pulberi uscate (pentru metoda uscată);
- pulberi în suspensie (pentru metoda umedă).

3.10 Metode de control cu pulberi magnetice

3.10.1 Metoda cu pulberi uscate

În cazul acestei metode, pulberile sunt depuse pe suprafața investigată prin pulverizare. În general, se folosesc pulberi ale căror dimensiuni se încadrează în domeniul 50 – 150 μm . Cu cât diametrul mediu al particulelor este mai mic cu atât dimensiunea defectului detectabil este mai mică, deoarece masa particulelor variază invers proporțional cu dimensiunea acestora. Cu cât masa acestora este mai mică cu atât se vor putea deplasa mai ușor pe suprafața examinată, sau cu atât vor fi mai ușor atrase de câmpuri de dispersie mai mici. În general, pulberile folosite nu conțin o singură clasă granulometrică ci un amestec de pulberi de diferite dimensiuni. Pulberile de dimensiuni mai mari sunt necesare pentru a permite închiderea câmpului de dispersie dat de defect de dimensiuni mari. Desigur, pulberile de dimensiuni mici pot fi suflate de pe suprafața examinată de o ușoară adiere de vânt, pot rămâne blocate în asperitățile suprafeței (rugozitate) sau pot adera la suprafața examinată ca urmare a unei curățări necorespunzătoare a acesteia. Toate aceste aspecte vor reduce considerabil sensibilitatea examinării conducând și la apariția unor indicații false.

Forma particulelor este extrem de importantă. În general, pulberile folosite sunt un amestec de particule rotunjite și particule alungite. Particulele alungite se aliniază foarte ușor pe direcția câmpului magnetic însă acestea se pot deplasa mai greu pe suprafața examinată. Acest neajuns este înlăturat de particulele rotunjite a căror mobilitate este net superioară. Majoritatea amestecurilor de particule magnetice au coeficientul de formă (raportul între lungime și diametru) cuprins între 1 și 2 [8].

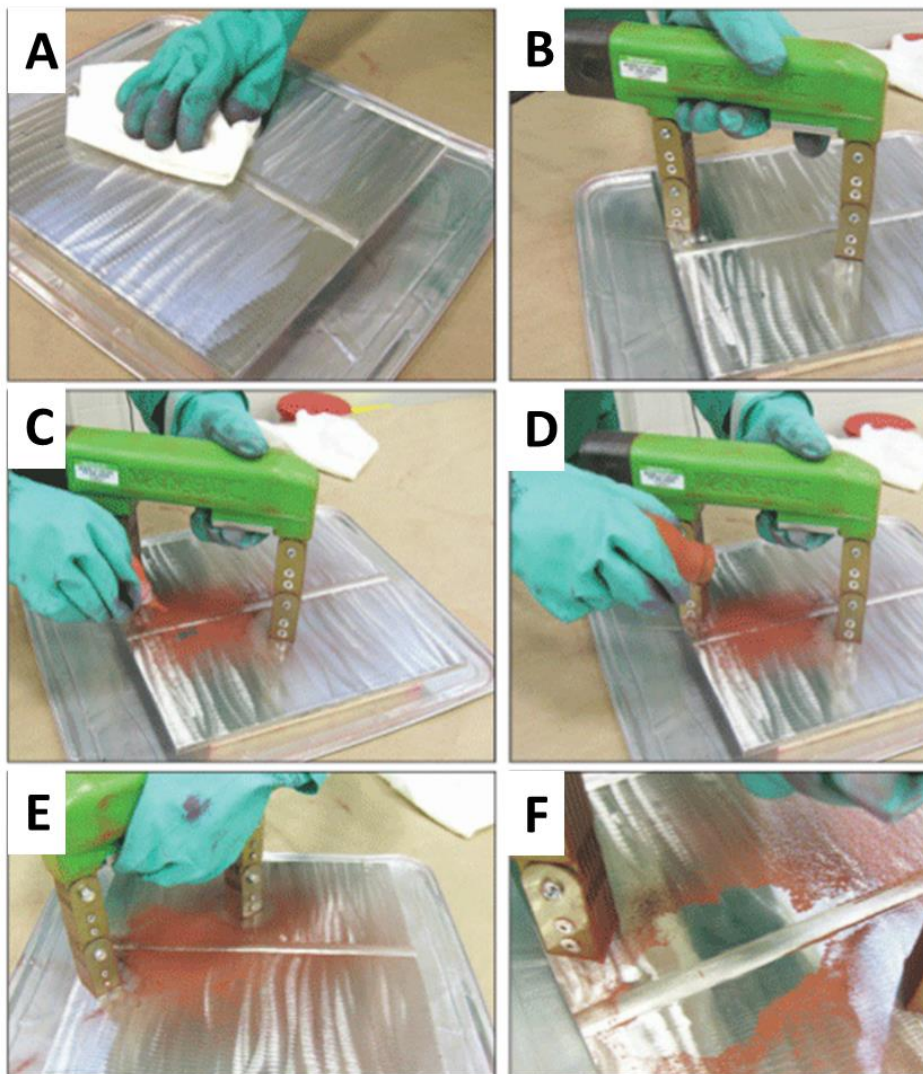


Figura 21. Succesiunea operațiilor controlului cu pulberi magnetice pentru metoda cu pulberi uscate [13].

Succesiunea operațiilor unui control cu pulberi magnetice este următoarea (figura 21): (A) curățarea suprafeței → (B) aplicarea câmpului magnetic → (C) aplicarea pulberii magnetice → (D) îndepărtarea prin suflare a surplusului de pulbere (proba este magnetizată în această etapă) → (E) analiza indicațiilor obținute → (F) aplicarea unui câmp magnetic perpendicular față de cel aplicat în etapa (B) și repetarea pașilor B, C, D și E.

3.10.2 Metoda umeda (cu pulberi în suspensie)

Pulberile folosite în cadrul acestei metode sunt produse sub formă de suspensie de pulberi magnetice în soluții pe bază de apă sau ulei. Această suspensie se aplică direct pe suprafața examinată prin pulverizare, metoda spray sau sub formă de jet. Această metodă este una mai sensibilă decât metoda cu pulberi uscate din următoarele motive [14]:

- se utilizează pulberi de dimensiuni mult mai mici (10 μm sau mai mici);

- lipsa contactului direct cu suprafața examinată conferă pulberilor un plus de mobilitate;
- prezența unor contaminanți pe suprafața examinată are un efect mai redus;
- aplicarea pulberilor pe suprafață se poate face într-un strat mult mai uniform.

Soluția purtătoare (soluția în care se afla pulberile în suspensie) poate fi pe bază de apă sau de uleiuri. Soluțiile apoase au o serie de avantaje în comparație cu soluțiile pe bază de uleiuri precum:

- formează mai rapid indicații, deoarece particulele se deplasează mai ușor în soluțiile apoase, fiindcă acestea au vâscozitate mai mică decât soluțiile pe baza de ulei;
- sunt mai ieftine;
- nu sunt inflamabile;
- sunt mai ușor de înlăturat de pe suprafața examinată la finalul controlului.

Soluțiile pe baza de uleiuri au o serie de avantaje față de soluțiile apoase:

- nu necesită inhibitori de coroziune;
- conferă protecție la fragilizarea cu hidrogen pentru materialele susceptibile la acest fenomen.

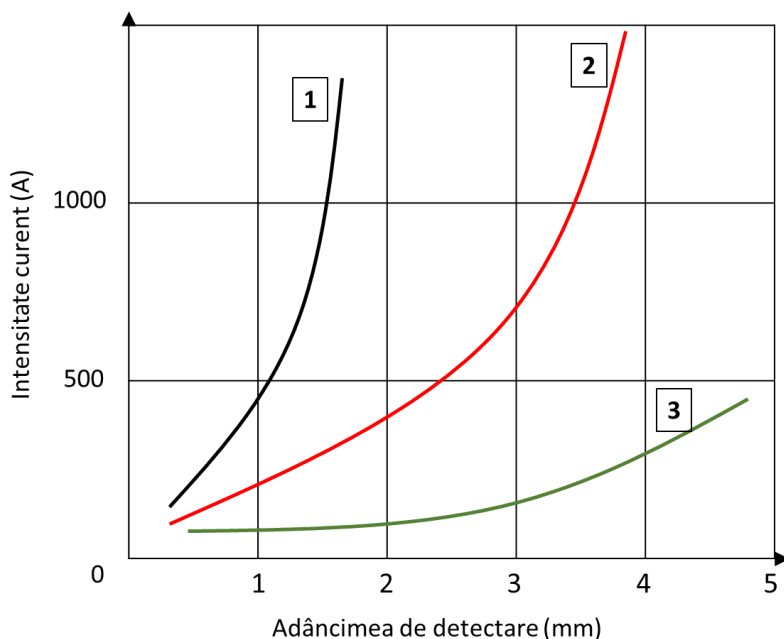


Figura 22. Legătura între intensitatea curentului aplicat unei piese, tipul curentului și adâncimea maximă de detectie. 1 – curent alternativ, 2 – curent continuu, metoda umedă, 3 – curent continuu, metoda uscată [adaptată după 10].

Sucesiunea operațiilor controlului cu pulberi magnetice folosind metoda umedă este următoarea: (A) curățarea suprafeței → (B) aplicarea suspensiei magnetice → (C) aplicarea câmpului magnetic → (D) analiza indicațiilor obținute → (F) aplicarea unui câmp magnetic perpendicular față de cel aplicat în etapa (C) și repetarea etapei de analiză a indicațiilor obținute. În general, jetul de suspensie magnetică este oprit sau redirecționat de pe suprafața probei cu scurt timp înaintea aplicării câmpului magnetic.

Adâncimea de detectare la controlul cu pulberi magnetice este influențată, pe lângă procedeul de magnetizare, intensitatea curentului injectat în probă și de metoda de control aleasă (umedă sau uscată). În figura 22 este prezentată o diagramă care arată legătura între curentul aplicat unei piese, tipul curentului și adâncimea maximă de detecție. Din figura 22 reiese că sensibilitatea maximă față de variația intensității curentului de magnetizare o prezintă metoda uscată. De asemenea, se observă că pentru a asigura o adâncime de detecție similară, intensitatea curentului alternativ trebuie să fie cu aproximativ un ordin de mărime mai mare decât în cazul folosirii curentului continuu.

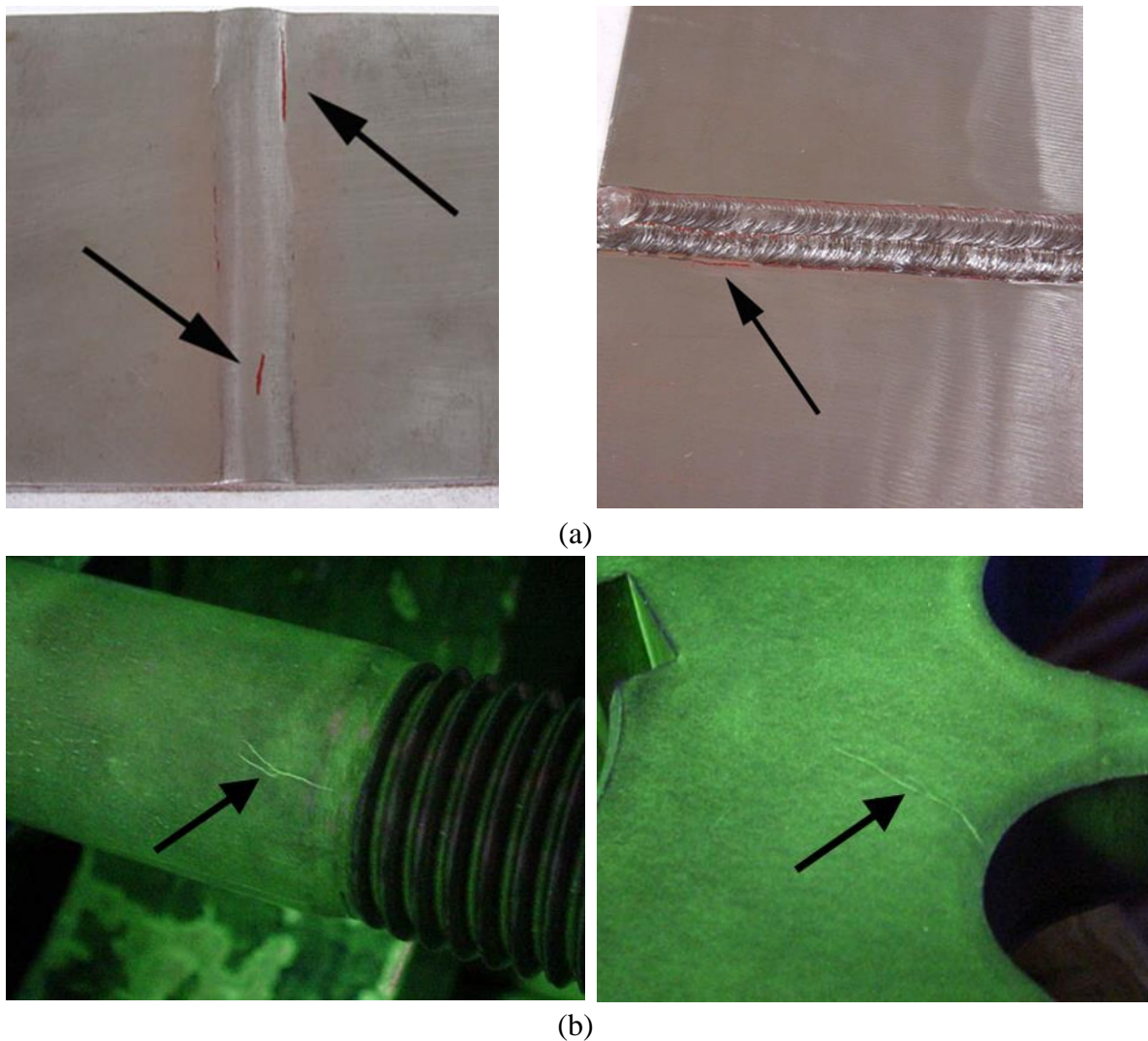


Figura 23. Indicații obținute prin control nedistructiv cu pulberi magnetice. (a) metoda cu pulberi colorate, (b) metoda cu pulberi fluorescente [15]

În figura 23 sunt prezentate câteva exemple de indicații obținute prin examinarea nedistructivă cu pulberi magnetice.

3.11 Analiza și interpretarea indicațiilor

Aglomerările de pulberi apărute pe suprafața examinată poartă denumirea de indicație. Indicațiile obținute pe o suprafața examinată cu pulberi magnetice se clasifică în 3 grupe: concludente/relevante, false și neconcludente. Indicațiile concludente sau relevante sunt indicații date de defecte. Indicațiile date de o tehnică necorespunzătoare sau de geometria piesei se numesc indicații false. Indicațiile pe baza cărora nu se poate stabili existența unui defect sau nu se poate determina natura acestora sunt denumite indicații neconcludente. Obținerea indicațiilor neconcludente impune repetarea examinării și, eventual, schimbarea parametrilor examinării (intensitate curent de magnetizare, direcția câmpului magnetic etc). Având în vedere cele menționate mai sus, putem trage concluzia că nu toate indicațiile obținute pe o suprafață indică prezența unui defect. Din punct de vedere geometric, indicațiile se clasifică astfel:

- indicații liniare, au lungimea mai mare decât triplul lățimii maxime;
- indicații rotunjite, au lungimea mai mică decât triplul lățimii maxime. Două sau mai multe indicații rotunjite formează un grup de defecte dacă pot fi încadrate într-un cerc cu diametrul de 20 mm.

Forma indicațiilor obținute prin control cu pulberi magnetice este similară cu forma obținută în urma controlului cu lichide penetrante, motiv pentru care nu va mai fi detaliată în acest capitol. Cititorul este îndrumat să revadă subcapitolul de examinare vizuala și interpretare a rezultatelor din capitolul de control nedistructiv cu lichide penetrante.

Indicațiile obținute în cadrul unei examinări se notează, fixează și/sau fotografiază pentru a putea fi folosit ca document justificativ al controlului. În laboratoarele moderne care utilizează această tehnică de control, înregistrarea și analiza rezultatelor se face automatizat/computerizat. Imaginile preluate de o camera video sunt analizate de softuri specializate.

O metodă modernă de fixare a rezultatelor unui control cu pulberi magnetice este metoda replicilor active. Suprafața examinată se acoperă cu un cauciuc lichid, care conține particulele magnetice ce vor migra și se vor aglomera în zonele unde există câmpuri de dispersie. În urma polimerizării cauciucului se obține o replică solidă permanentă a suprafeței, care conține indicațiile defectelor din zona examinată. Această replică poate fi apoi analizată iar pentru evidențierea unor defecte foarte mici examinarea replicii se poate face și sub microscop [16].

3.12 Demagnetizarea pieselor

De cele mai multe ori, după examinare, piesele trebuie demagnetizate, deoarece magnetizarea remanentă poate afecta eventualele prelucrări ulterioare (prelucrări prin așchiere, sudare etc). Din cauza magnetizării remanente, pulberile magnetice folosite rămân fixate pe suprafața examinată, iar în cazul unor prelucrări ulterioare controlului, bucăți de șpan sau pilitură pot adera la suprafață. Necesitatea demagnetizării pieselor examinate cu această tehnică este exemplificată în figura 24, unde este prezentată o piesă din oțel înainte și după demagnetizare. Piesele examinate, având o magnetizare remanentă, pot interfera și perturba funcționarea altor echipamente electrice din laborator. Exista mai multe metode de

demagnetizare a căror principiu variază de la încălzirea probei, până la trecerea unui curent direct prin probă.

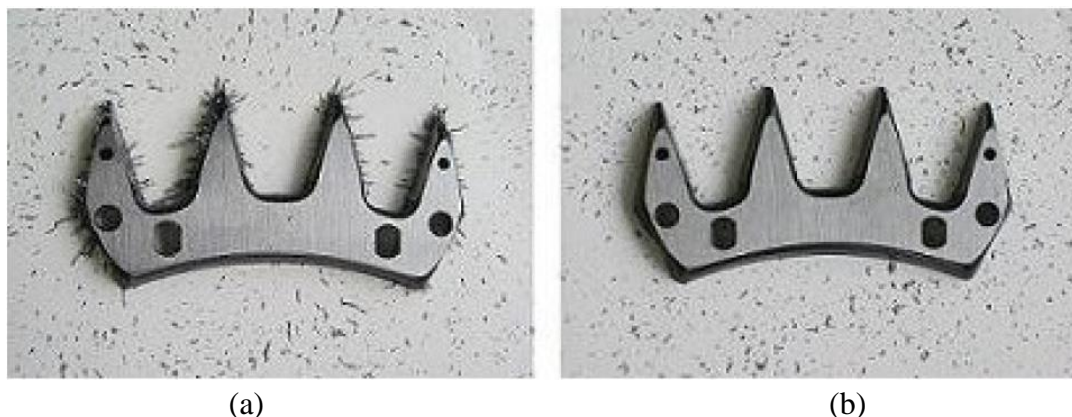


Figura 24. Piesa din oțel după controlul cu pulberi magnetice (a), și după operația de demagnetizare (b) [11].

O metoda facilă de a demagnetiza un material feromagnetic este aceea de a-l încălzi la o temperatură ușor superioară temperaturii Curie a acestuia. Temperatura Curie este temperatura la care un material feromagnetic își schimbă comportamentul trecând din feromagnetic în paramagnetic. Temperatura Curie a fierului este de 770 °C, oțelurile cu conținut scăzut de carbon având temperaturi Curie apropiate de această valoare. Această metodă este costisitoare și se aplică doar în cazul în care temperatura la care trebuie încălzit materialul este apropiată sau identică cu temperatura unui tratament termic ce urmează să i se aplice piesei.

O altă metodă constă în trecerea piesei prin interiorul unei bobine alimentate cu un curent electric alternativ (figura 25). Ca urmare a deplasării piesei prin bobină are loc o reducere treptată a câmpului magnetic aplicat piesei. De reținut este faptul că, intensitatea câmpului magnetic produs de bobină trebuie să fie mai mare decât câmpul coercitiv a piesei. Această metodă nu se aplică pieselor de dimensiuni mari datorită efectului pelicular a câmpului magnetic creat de un curent alternativ, care nu permite demagnetizarea în profunzime a piesei. Pentru înlăturarea acestui inconvenient, bobina poate fi alimentată cu un curent continuu. Polaritatea curentului se schimbă cu o frecvență cât mai scăzută concomitent cu reducerea treptată a intensității curentului din bobină. La finalul procesului de demagnetizare intensitatea curentului din bobină trebuie să fie nulă.

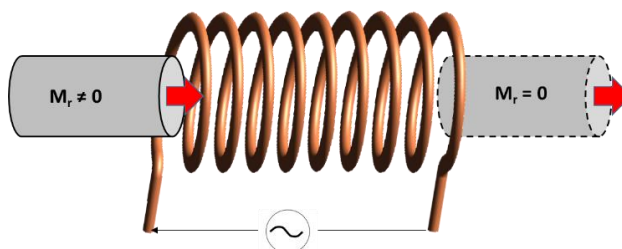


Figura 25. Demagnetizarea unei piese cu ajutorul unei bobine parcurse de curent alternativ.

Trecerea unui curent electric prin probă va produce un câmp magnetic circular, așa cum am văzut în paragrafele anterioare. Dacă amplitudinea curentului aplicat scade treptat, în piesă se va induce un câmp magnetic atenuat, similar cu cel prezentat în figura 26. Acest câmp va magnetiza și demagnetiza proba cu intensități din ce în ce mai mici, materialul descriind cicluri de histerezis cu magnetizare descrescătoare până, teoretic, la valoarea 0, așa cum se poate observa în figura 26.

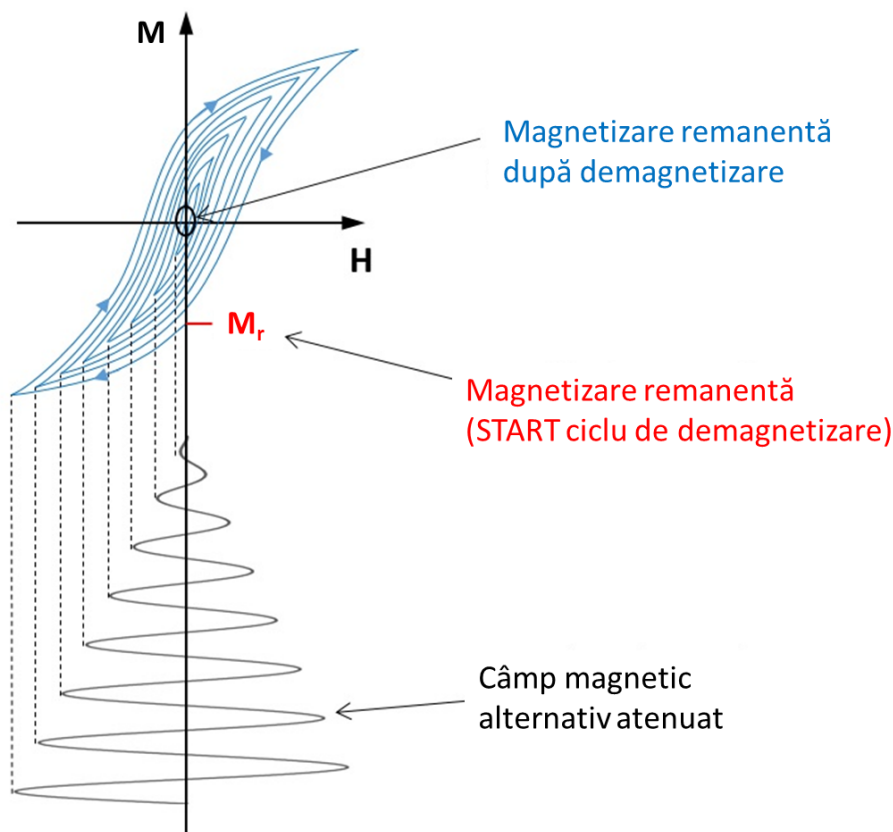


Figura 26. Demagnetizarea prin trecerea unui curent alternativ atenuat prin probă.

Demagnetizarea pieselor magnetizate local se poate realiza și cu ajutorul jugurilor magnetice, alimentate cu curent alternativ sau continuu reversibil (a cărui polaritate se poate schimba) cu amplitudine descrescătoare până la zero.

3.13 Avantajele și dezavantajele controlului cu pulberi magnetice

Principalele avantaje ale controlului cu pulberi magnetice sunt:

- permite detectarea defectelor de suprafață și din apropierea suprafeței, spre deosebire de controlul cu lichide penetrante, care pune în evidență doar defectele care comunică cu suprafața;
- pregătirea suprafeței înaintea controlului nu este o operație atât de pretențioasă ca și în cazul lichidelor penetrante;
- se pot examina cu ușurință piese cu geometrie complexă;
- este o metodă rapidă și indicațiile obținute sunt vizibile pe suprafața examinată (indică exact poziția defectului);

- este o metodă ieftină în comparație cu alte tehnici;
- este o metodă extrem de portabilă în condiția în care se utilizează echipamente alimentate de la o baterie;
- poate fi aplicată în medii în care alte tehnici nu se pot aplica sau dau rezultate nesatisfăcătoare (subacvatic, atmosfere cu risc ridicat de explozie etc.).

Principalele dezavantaje ale controlului cu pulberi magnetice sunt următoarele:

- se aplică doar materialelor feromagnetice. Aliajele neferoase și marea majoritate a oțelurilor inoxidabile nu pot fi analizate prin această tehnică.
- capacități limitate de detecție pentru defectele situate în profunzime;
- nu furnizează informații despre adâncimea la care se află defectul;
- este necesară curățarea și demagnetizarea probei după examinare;
- realizarea controlului se face pe două direcții perpendiculare;
- examinarea unor piese de dimensiuni mari necesită surse de curent speciale.

3.14 Bibliografie

[1] Ionel Chicinaș, Mărimi magnetice de material, Editura Casa cărții de știință, Cluj-Napoca, 2002, ISBN: 973-686-286-0

[2] B. D. Cullity, C. D. Graham - Introduction to magnetic materials, Editura Wiley-IEEE Press, 2008, ISBN: 978-0-471-47741-9

[3] P. Robert, Traité electricit , Vol. 2 - Matériaux de l' lectrotechnique, Editura Jaques Neirynek, 1999, ISBN : 2-04-016933-3

[4] G. Couderchon, Alliages magnétiques doux, Techniques de l'ingénieur Traité Génie  lectrique M 350, 1-32.

[5] V. Pop, I. Chicinaș, N. Jumate, Fizica materialelor. Metode experimentale, Presa universitară clujeană, Cluj-Napoca, 2001, ISBN 973-610-036-7

[6] Hobart Institute of Welding Technology, Nondestructive Testing Methods, Training Workbook, cod: EW-512-6, ISBN: 978-1-936058-23-5.

[7] A. Hijazi, Introduction to Non-Destructive Testing Technique, disponibil online: <https://eis.hu.edu.jo/acuploads/10526/Liquid%20Penetrant%20Testing.pdf>

[8] https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/cc_mpi_index.htm

[9] P. Ciorău, D. Coca, I. Crudu et al.  ncercarea Materialelor, Controlul nedistructiv al materialelor, Editura Tehnică, Bucuresti 1986.

[10] Voicu Ionel Safta, Voicu Ioan Safta, Defectoscopie nedistructivă industrială, Editura Tehnică, Timișoara, 2001, ISBN 973-99425-6-3.

[11] T. Luthi, Non-Destructive Evaluation Methods, 2013, disponibil online: [https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20\(2014\).pdf](https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20(2014).pdf)

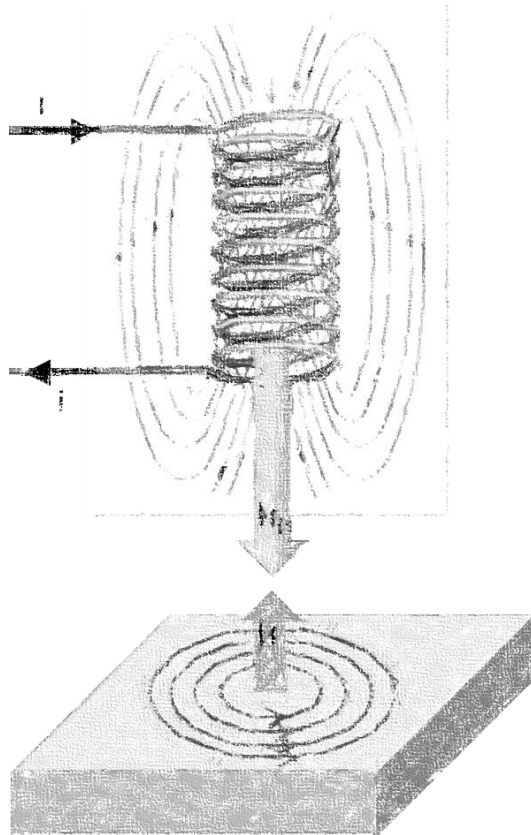
[12] International Atomic Energy Agency (IAEA), TCS 9, Non-destructive Testing: A Guidebook for Industrial Management and Quality Control Personnel, cod: XA0053527, 1999, disponibil online:

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/005/31005449.pdf

- [13] J. Worman, Magnetic Particle Inspection, Inspection Trends Magazine, 22-25, Nov. 2016.
- [14] C.E. Betz, Principles of magnetic particle testing, Editat de Megaflux, 1967, ISBN-13: 978-0318214856.
- [15] http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage_testing_prevention_and_detection_in_aeronautics/Intro_to_Mag.ppt
- [16] S. K. Burke, M. E. Ibrahim, G. R. Hugo, Principles and Application of Magnetic Rubber Testing for Crack Detection in High-Strength Steel Components: I. Active-Field Inspection, Editat de Maritime Division Defence Science and Technology Organisation, cod: DSTO-TR-3032, 2015.

Capitolul 4

Controlul nedistructiv cu curenți turbionari



4.1 Introducere

Curenții turbionari au fost descoperiți de fizicianul francez Leon Foucault în 1851, din acest motiv, curenții turbionari sunt uneori numiți curenți Foucault. Foucault a construit un dispozitiv care folosea un disc de cupru care se deplasa într-un câmp magnetic intens. Acesta a arătat că atunci când un material se mișcă într-un câmp magnetic aplicat din exterior, sunt generați curenți în material, care produc câmpuri magnetice ce îngreunează deplasarea materialului.

Defectoscopia cu curenți turbionari a început, în mare măsură, ca urmare a descoperirii inducției electromagnetice de către cercetătorul englez Michael Faraday în 1831. Faraday a descoperit că, atunci când un câmp magnetic trece printr-un conductor, sau când un conductor electric se deplasează printr-un câmp magnetic, în conductor va apărea un curent electric. În 1879, un alt progres a fost făcut atunci când David Hughes, a demonstrat că, proprietățile unei bobine parcurse de curent electric, se schimbă în funcție de conductivitatea electrică și permeabilitatea magnetică a materialului cu care bobina este în contact. Cu toate acestea, până în cel de-al doilea război mondial, aceste descoperiri nu au fost puse în practică pentru testarea materialelor.

Începând din 1933, în Germania, profesorul Friedrich Förster, în timp ce lucra pentru Institutul Kaiser-Wilhelm, a adaptat tehnologia curenților turbionari pentru aplicații industriale. Förster a dezvoltat echipamente pentru măsurarea conductivității și pentru sortarea pieselor feroase cu defecte, față de cele fără defecte, folosind tehnologia curenților turbionari. În 1948, Förster și-a înființat propria companie în Reutlingen (Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG), o afacere bazată pe defectoscopia cu curenți turbionari, companie care continuă să existe și în prezent. Progrese semnificative s-au făcut pe parcursul anilor 1950 și 1960, în special în industria aeronautică și nucleară. Dezvoltările ulterioare ale acestei tehnici au dus la îmbunătățirea performanțelor și dezvoltarea de noi aplicații. Testarea cu ajutorul curenților turbionari este acum o tehnică de control bine înțeleasă și folosită pe scară largă pentru detectarea defectelor din materiale, precum și pentru măsurători de grosime și conductivitate electrică.

Testarea cu curenți turbionari este o metodă nedistructivă pentru testarea suprafețelor metalice, pentru defecte cum ar fi fisuri sau discontinuități. Astfel de defecte de suprafață influențează traseul curenților turbionari din probă, ceea ce permite detectarea manuală sau automată a acestora.

În condiții optime, pot fi detectate defecte de până la 30 μm . În general, realizarea unui control cu curenți turbionari nu presupune existența unui contact cu proba examinată, din acest motiv, testarea cu curenți turbionari nu deteriorează și nici nu contaminează suprafețele examinate. De asemenea, costurile reduse de mentenanță pentru echipamentele de control cu curenți turbionari și influența redusă asupra mediului înconjurător, au făcut ca această tehnică să fie una dintre cele mai răspândite tehnici de control din producție. În plus, vitezele mari de testare și nivelul ridicat de automatizare la care s-a ajuns cu această tehnică permit testarea diverselor piese în flux continuu fără a fi nevoie de oprirea producției.

4.2 Principiul fizic care stă la baza defectoscopiei cu curenți turbionari

Această metodă se bazează pe aplicarea unui câmp magnetic alternativ asupra porțiunii controlate a piesei, câmp care va da naștere unor curenți turbionari în piesă și implicit la apariția unui câmp magnetic secundar, urmând a se studia acțiunea câmpului magnetic secundar asupra unei bobine de detecție. Este cunoscut faptul că, atunci când o bobină parcursă de un curent alternativ este adusă în vecinătatea unui material metallic, în acesta vor lua naștere, în apropierea suprafeței, curenți alternativi numiți curenți turbionari sau curenți Foucault.

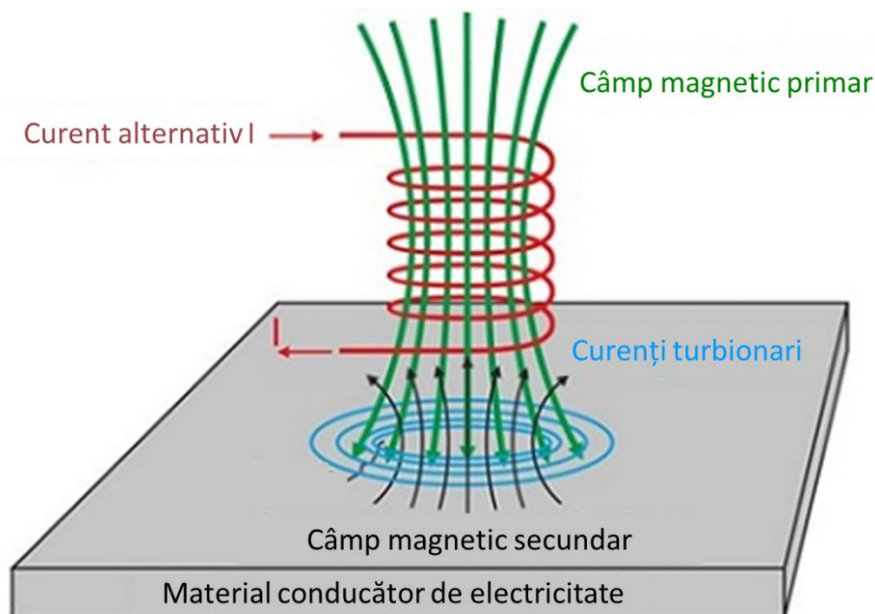


Figura 1. Apariția curenților turbionari și a câmpului magnetic secundar creat de aceștia, ca urmare a aplicării câmpului magnetic alternativ (câmp magnetic primar) produs de o bobină parcursă de un curent alternativ [1].

Acest lucru poate fi enunțat și astfel: „în fiecare element de volum a unui conductor plasat într-un câmp magnetic variabil iau naștere forte electromotoare de inducție (tensiune electromotoare) notate cu e , ca urmare a curenților induși”. Sensul acestor curenți în material respecta legea lui Lenz: Tensiunea electromotoare "e" care apare într-un material sub efectul unui câmp magnetic variabil are întotdeauna un sens, astfel încât acesta tinde să se opună variației fluxului magnetic care l-a produs. O exprimare mai poetică a legii lui Lenz (adesea prezentată în liceele din țara noastră) este:

*„Eu, curentul cel indus
Totdeauna m-am opus
Cauzei ce m-a produs”*

Exprimarea matematică a acestei legi este următoarea:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

unde $d\Phi$ reprezintă variația câmpului magnetic în intervalul de timp dt . Unitatea de măsura a tensiunii electromotoare este voltul. Curenții induși în materialul metalic sunt conținuți în plane paralele cu suprafața materialului, iar sensul lor este în așa fel încât câmpul magnetic creat de aceștia se va opune câmpului magnetic care i-a creat. În concluzie, cele două câmpuri sunt în opoziție unul față de celălalt. Așadar, intensitatea și distribuția curenților turbionari în material are o influență directă asupra bobinei, modificându-i impedanța. Măsurarea continuă a impedanței bobinei permite detectarea defectelor din material, deoarece acestea modifica traiectoria naturală a curenților turbionari.

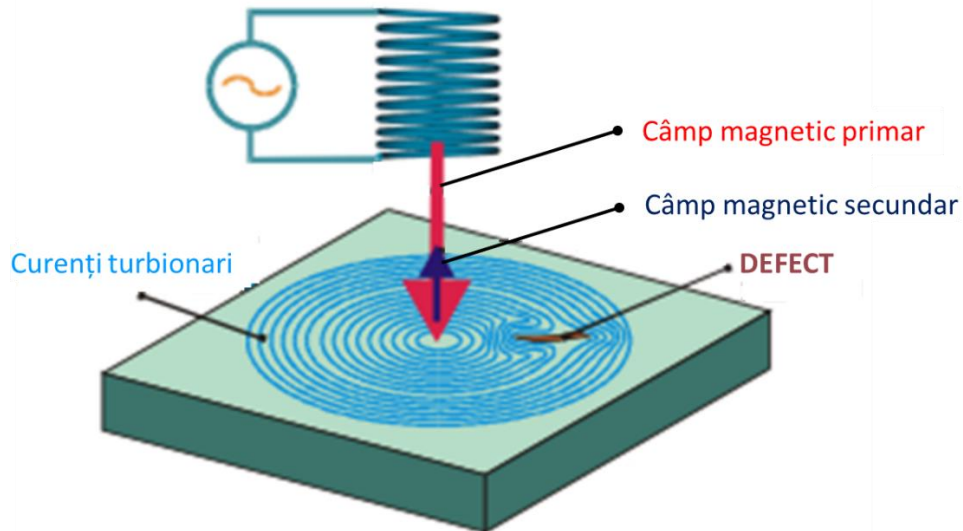


Figura 2. Modificarea traiectoriei curenților turbionari indusă de prezența unui defect [2].

Conform legii lui Ohm, tensiunea într-un circuit (u) este egală cu produsul dintre intensitatea curentului ce trece prin circuit (i) și rezistența electrică a circuitului considerat (R).

$$u = R \cdot i \quad (2)$$

În cazul în care circuitul este format dintr-un conductor înfășurat în așa fel încât să formeze mai multe spire, formând astfel o bobină, nu mai putem discuta de rezistența sa electrică. În cazul bobinelor parcurse de un curent alternativ (i) termenul corect este impedanță (Z). Tensiunea la bornele unei astfel de bobine poate fi calculată cu legea lui Ohm conform relației:

$$u = Z \cdot i \quad (3)$$

unde u este tensiunea la bornele bobinei, Z este impedanța bobinei și i este curentul ce trece prin bobină. Impedanța unei bobine este compusă din doi termeni, unul pur rezistiv notat cu R și celălalt denumit reactanță inductivă notată cu X și a cărei expresie matematică este:

$$X = L \cdot \omega \quad (4)$$

unde L este inductanța bobinei și ω este pulsația curentului ce trece prin bobină. Pulsația unui curent alternativ poate fi calculată cu relația:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (5)$$

unde f este frecvența curentului alternativ considerat.

Așadar, impedanța unei bobine poate fi scrisă sub forma:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \cdot \omega^2} \quad (6)$$

În figura 3a este dată o reprezentare vectorială a inductanței unei bobine. Se poate observa că, între reactanța inductivă ($L\omega$) și componenta pur rezistivă (R), există un defazaj de $+\frac{\pi}{2}$. Multiplicând cei doi termeni cu valoarea instantanee a curentului (i), vom observa că tensiunea la bornele bobinei (u) este suma vectorială a doua componente, una rezistivă (v_r) și una reactivă (v_x) (figura 3b).

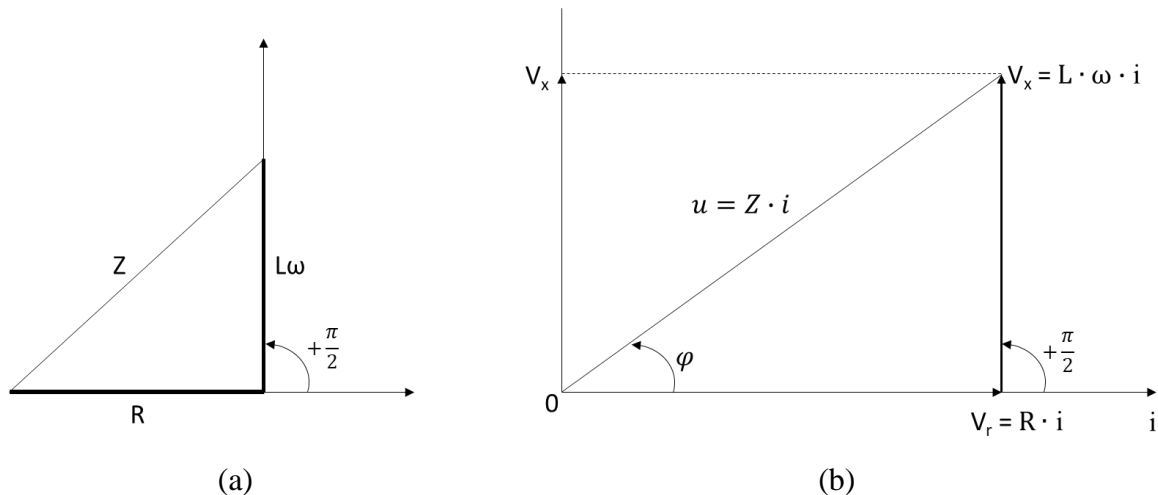


Figura 3. Reprezentarea vectorială a impedanței (a) și a tensiunii la bornele unei bobine (b).

În același timp, între tensiunea rezultată (u) și intensitatea curentului (i) de la bornele bobinei există un defazaj (φ) a cărui exprimare matematică este:

$$tg(\varphi) = \frac{L \cdot \omega}{R} \quad (7)$$

În figura 4 este prezentat un circuit echivalent și defazajul dintre curentul și tensiunea de la bornele bobinei.

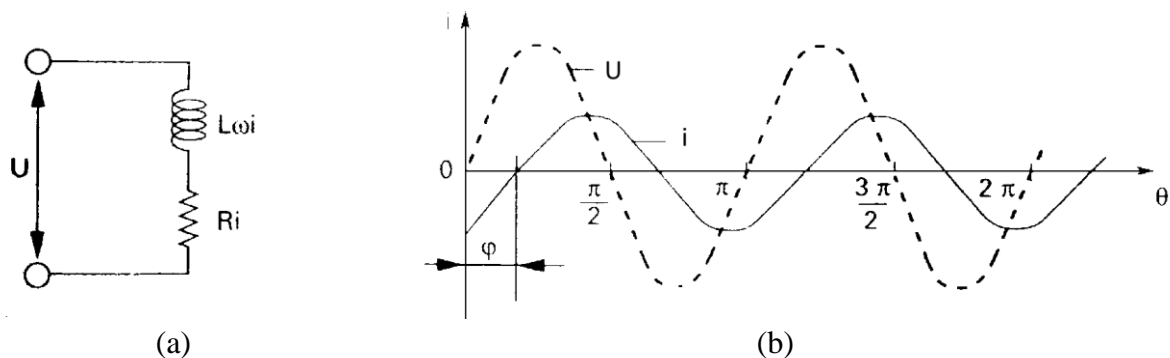


Figura 4. Circuitul echivalent și defazajul dintre curent și tensiune la bornele bobinei [3].

Prezența curenților turbionari într-un material situat în vecinătatea unei bobine parcurse de un curent electric, va conduce la modificarea componentei rezistive și reactive a impedanței bobinei, la modificarea defazajului dintre curent și tensiune și deci la modificarea tensiunii de la bornele bobinei.

În figura 5 este prezentată o reprezentare vectorială a unui plan denumit planul impedanței. Figura 5a reprezintă planul impedanței Z_0 a bobinei considerate, în cazul în care în apropierea bobinei nu există nici un material metalic (în gol), iar figura 5b corespunde cazului în care în apropierea bobinei avem un material conducător de electricitate fără defecte. Punctul P_0 , care corespunde extremității vectorului impedanță Z_0 în gol, se va deplasa în poziția P_1 corespunzătoare impedanței Z_1 , dacă în vecinătatea bobinei este adus un material metalic conductor de electricitate fără defecte. În consecință, orice modificare a impedanței bobinei este însoțită de o modificare a modulului (lungimii vectorului) și fazei (φ) a vectorului impedanță. Dacă în materialul din vecinătatea bobinei există defecte, acestea vor modifica intensitatea și distribuția curenților turbionari din piesă, punctul P_1 se va deplasa în poziția P_2 adică va avea loc o nouă schimbare a modulului și fazei vectorului impedanță.

Trebuie menționat că nu numai prezența defectelor va conduce la această modificare, ci orice variație a proprietăților fizico-chimice sau variație dimensională a materialului va conduce la modificarea poziției punctului P_1 din planul impedanței.

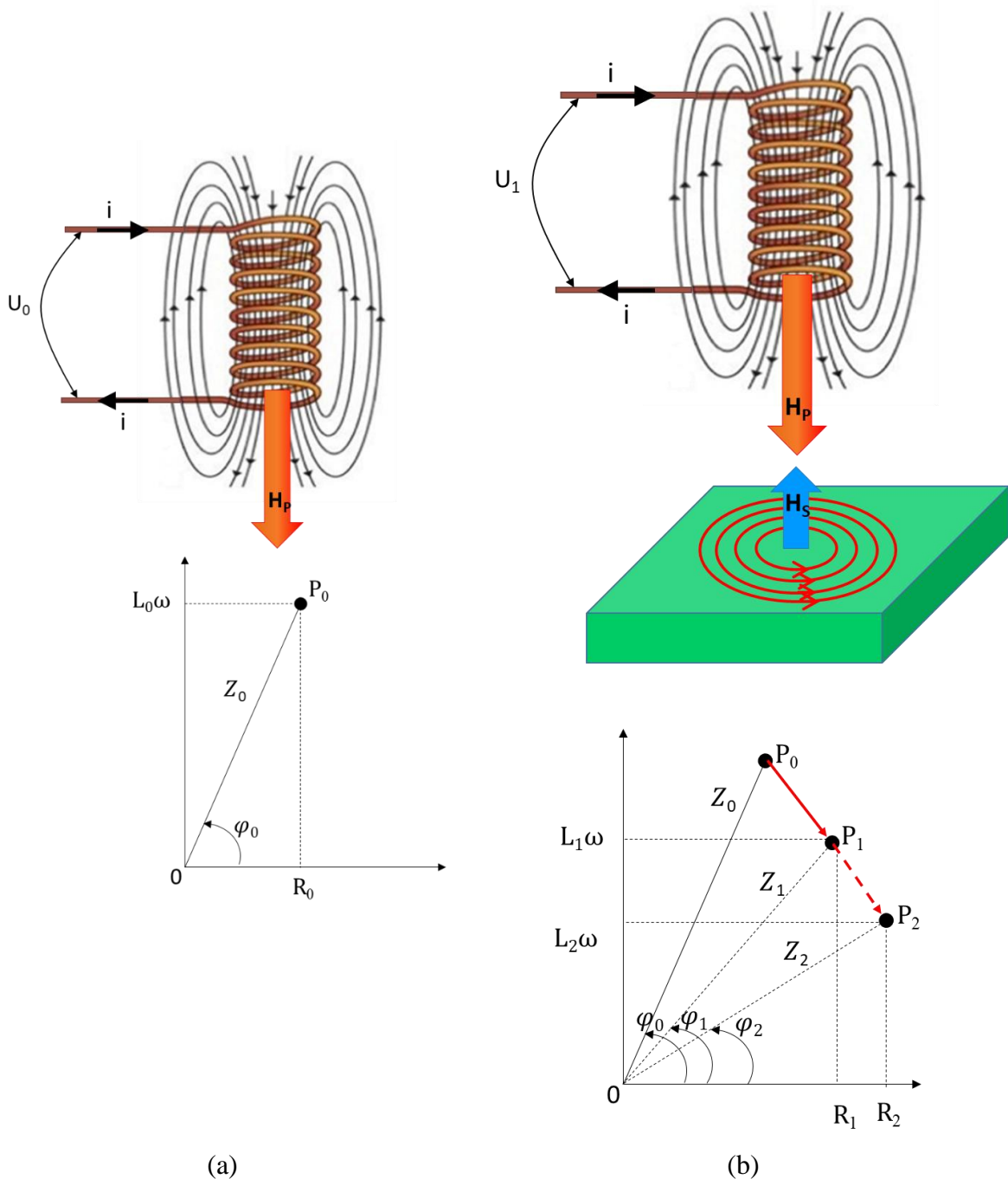


Figura 5. Planul impedanței Z_0 pentru o bobină în cazul în care în apropierea bobinei nu există nici un material metalic (a) și a cazului în care în apropierea bobinei avem un material conducător de electricitate fără defecte (b). H_p – câmp magnetic primar, H_s – câmp magnetic secundar produs de curenții turbionari.

4.3 Caracteristicile curenților turbionari

Având în vedere că punerea în evidență a unui defect se realizează pe baza curenților induși de către bobina de detecție, este important să menționăm câteva caracteristici ale acestor curenți turbionari, care influențează capacitatea de detecție a acestei tehnici. Curenții turbionari circulă într-un material formând bucle concentrice iar prezența unor defecte în material va duce

la modificarea traseului acestor curenți. Traseul curenților turbionari este paralel cu spirele bobinei ce i-a produs și perpendicular pe axa longitudinală a acesteia. De aici reiese că, orientarea bobinei în raport cu materialul examinat, influențează traseul curenților turbionari în material, orientarea și geometria bobinei putând fi alese astfel încât să se obțină rezultatele scontate.

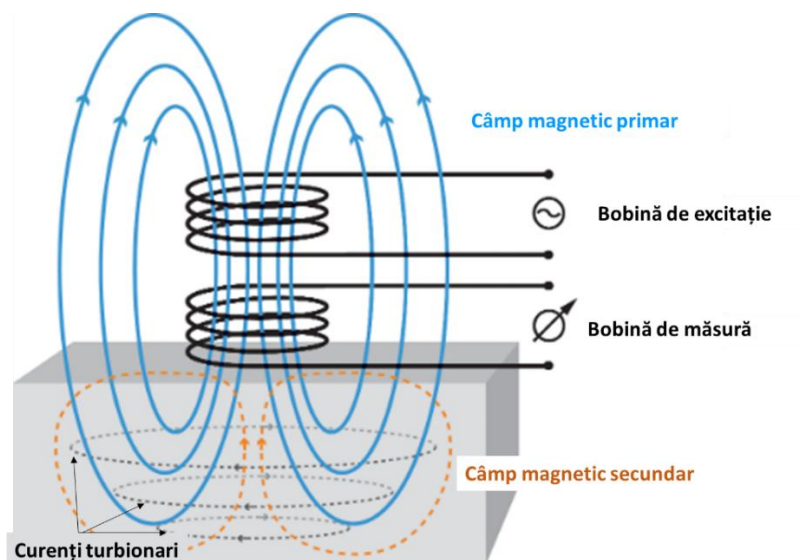


Figura 6. Traseul curenților turbionari într-o probă metalică [adaptată după 4].

Gradul de detecție a unor defecte de material este condiționat și proporțional cu gradul de perturbare a traseului curenților turbionari [5]. Orientarea defectelor în raport cu traseul curenților turbionari din probă influențează detectabilitatea acestora. Defectele a căror axă longitudinală este paralelă cu traseul curenților turbionari produc cea mai mică perturbare a traseului acestora și, drept urmare, sunt greu detectabile. Defectele a căror axă longitudinală este perpendiculară pe traseul curenților din probă vor fi cel mai ușor de detectat (figura 7).

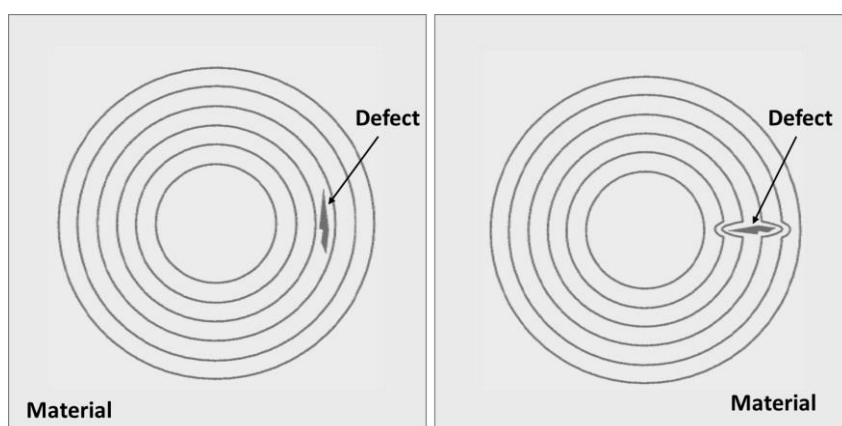


Figura 7. Perturbarea traseului curenților turbionari în funcție de orientarea defectului [5].

Trecerea curenților turbionari prin probă se realizează pe traseul pe care ei întâmpină rezistența minimă. Astfel, în cazul defectelor neconducătoare de electricitate cu lungime mare

și adâncime mică, curenții vor prefera să treacă pe sub defect iar în cazul defectelor cu adâncime mare și lungime mică, curenții vor ocoli defectul.

Liniile de curent formează traiectorii circulare în material, cu condiția ca acestea să nu intersecteze discontinuități sau limite (marginii) ale materialului. În cazul în care acestea întâlnesc discontinuități sau limite ale materialului, liniile de curent vor fi perturbate sau comprimate (în cazul marginilor materialului, figura 8) [5].

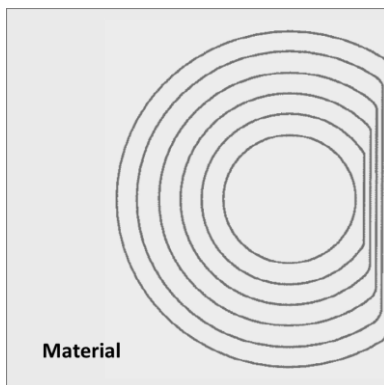


Figura 8. Comprimarea curenților turbionari de către marginea materialului [5].

Din moment ce curenții turbionari sunt creați de un câmp magnetic alternativ produs de o bobină, curenții turbionari sunt curenți alternativi. Frecvența curenților turbionari este dependentă de frecvența curentului din bobina de excitație.

Densitatea curenților turbionari variază în interiorul materialului examinat datorită efectului pelicular (în engleză *skin effect*). Densitatea curenților turbionari este maximă la suprafața materialului și scade după o lege exponențială, în profunzimea materialului, conform relației:

$$I = I_0 \cdot e^{-x(\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \lambda)} \quad (8)$$

unde I_0 este densitatea de curent de la suprafața piesei [$A \cdot m^2$], x este profunzimea față de suprafață, [m], f este frecvența curentului de excitație, [Hz], μ_r este permeabilitatea relativă a materialului și λ este conductivitatea electrică a materialului, [$m/\Omega mm^2$].

Așadar, testarea cu curenți turbionari a unor materiale cu grosime mare permite examinarea doar a stratului superficial din material, sensibilitatea determinării scăzând rapid cu adâncimea (adâncimea la care se preconizează a exista un defect). Examinarea întregului volum a unei piese este posibilă doar în cazul pieselor cu pereți subțiri. Adâncimea de penetrare a curenților turbionari, sau adâncimea standard de penetrare (δ), este definită ca adâncimea la care intensitatea curenților turbionari scade la valoarea de $1/e$ sau aproximativ 37% din intensitatea curenților de pe suprafață examinată (e este baza logaritmului natural, $e = 2.71828$). Cu toate că, curenții turbionari penetrează mai adânc în material decât o adâncime standard de penetrare (1δ), intensitatea lor scade rapid cu adâncimea. La două adâncimi standard de penetrare (2δ), densitatea curenților turbionari scade la $1/e^2$ respectiv 13,5% din densitatea de suprafață. La trei adâncimi standard de penetrare (3δ), densitatea curentului turbionar este de numai $1/e^3$ respectiv 5% din densitatea de suprafață. Pentru adâncimi de penetrare mai mari de

3δ , intensitatea curenților turbionari este prea mică pentru a produce un semnal detectabil. Adâncimea standard de penetrare, măsurată în milimetri se poate calcula cu relația:

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} \quad (9)$$

unde ρ este rezistivitatea materialului examinat, f este frecvența câmpului magnetic creat de bobina de excitație și μ_r este permeabilitatea relativă a materialului.

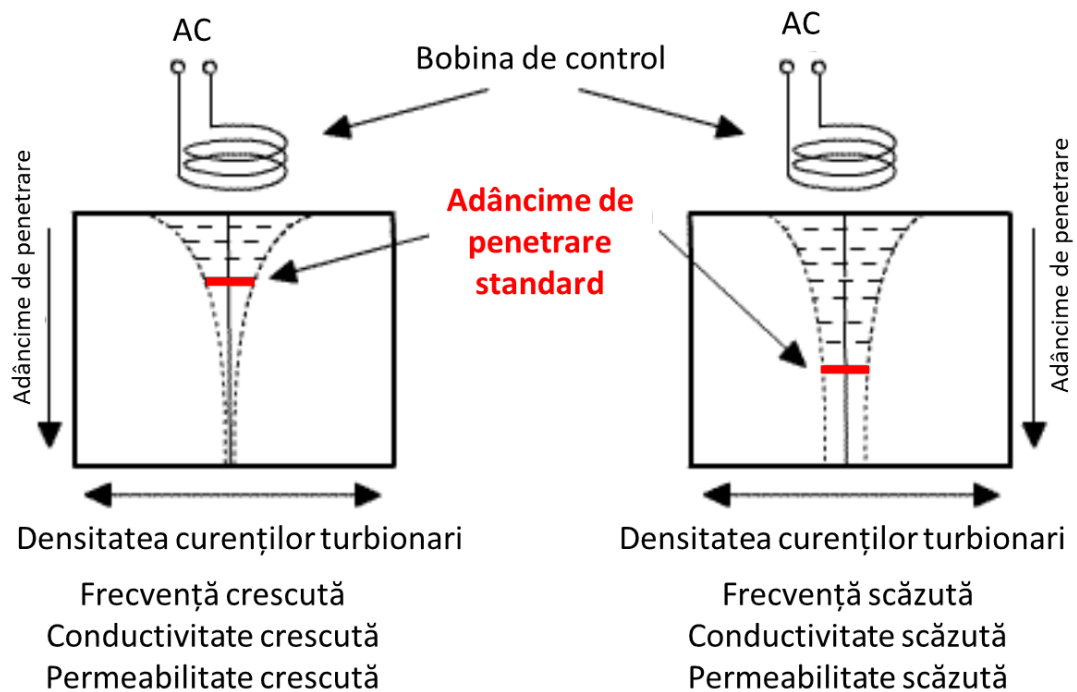


Figura 9. Variația adâncimii standard de penetrare în funcție de caracteristicile materialului și de frecvență [6, 7].

Această formulă este validă doar în cazul materialelor cu grosime infinită dar, având în vedere că la o adâncime de 5δ intensitatea curenților este de numai 0.0067% din intensitatea de suprafață, orice modificare a grosimii unui material care depășește valoarea de 5δ va produce un efect atât de scăzut, încât materialul poate fi considerat ca având grosime infinită.

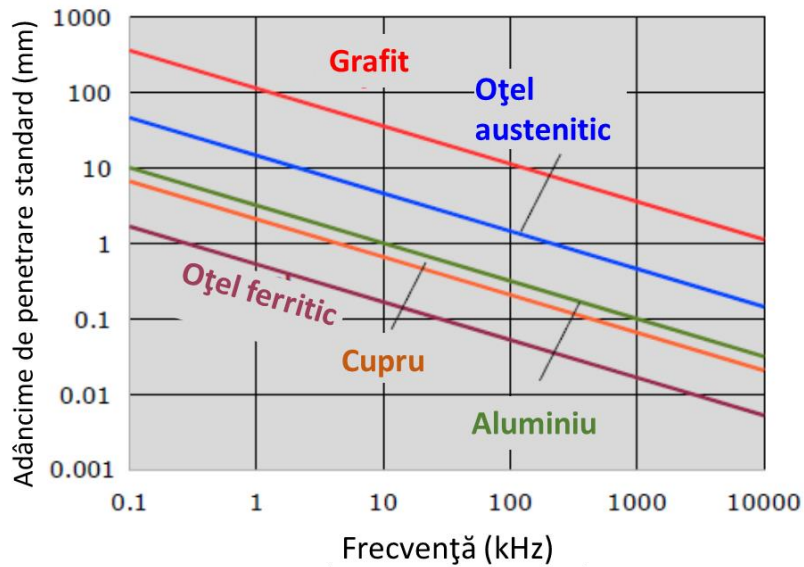


Figura 10. Variația adâncimii de penetrare standard în funcție de frecvență pentru grafit, cupru, aluminiu, oțel austenitic și oțel feritic [7].

Între curenții turbionari creați la suprafața unui material și cei creați la o anumită adâncime există un defazaj notat cu β . Defazajul apare datorită faptului că, curenții turbionari formați la o anumită adâncime din probă se vor forma mai târziu decât curenții turbionari de pe suprafața probei. Acest defazaj este un parametru care face posibilă obținerea de informații despre adâncimea la care se afla un defect într-un material.

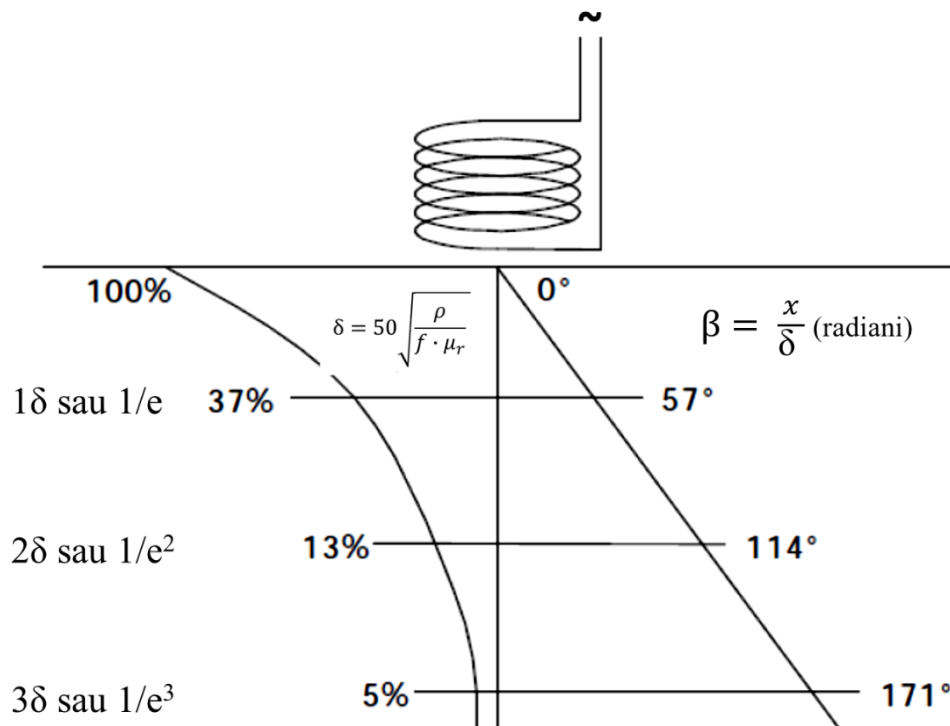


Figura 11. Defazajul între curenții turbionari de la suprafața probei și cei formați la diferite adâncimi standard de penetrare [8].

De exemplu, defazajul între curenții turbionari de la suprafață și cei formați la o adâncime standard de penetrare (1δ) este de 1 radian sau 57° , la adâncimea standard de penetrare 2δ defazajul este de 114° (figura 11). Așadar, măsurând defazajul unui semnal dat de un defect în raport cu curenții turbionari de suprafață, se poate stabili adâncimea defectului respectiv.

4.4 Factori care influențează examinarea cu curenți turbionari

Cei mai importanți factori care influențează rezultatele unui control cu curenți turbionari sunt [7]:

- Conductivitatea electrică a materialului;
- Permeabilitatea magnetică a materialului;
- Frecvența curentului din bobina de excitație;
- Designul senzorului;
- Distanța piesa-senzor (în engleză lift-off);

Dintre acești factori, frecvența curentului și designul senzorului pot fi alese de către cel care realizează controlul.

4.4.1 Conductivitatea electrică a materialului examinat

Cu cât conductivitatea electrică a materialului examinat este mai mare, cu atât sensibilitatea metodei în detecția defectelor de suprafață este mai mare. În același timp, adâncimea de penetrare a curenților turbionari va fi mai mică. Scăderea adâncimii de penetrare se explică prin aceea că, aplicarea unui câmp magnetic variabil asupra unui material va induce, mai întâi, curenți turbionari la suprafața acestuia și apoi din ce în ce mai în adâncimea (profundimea) acestuia. Cu cât conductivitatea electrică a materialului este mai mare, cu atât intensitatea curenților turbionari de la suprafață va fi mai mare și, drept urmare, câmpul magnetic secundar va fi mai intens. Câmpul magnetic primar (produs de bobină) și câmpul magnetic secundar (produs de curenții turbionari) sunt în opoziție și, cu cât câmpul magnetic secundar este mai intens, cu atât are loc o diminuare mai pronunțată a intensității câmpului magnetic primar. Din cauza faptului că fluxul magnetic primar este redus, un flux din ce în ce mai scăzut va produce curenți turbionari în adâncimea probei, ceea ce va duce la o adâncime de penetrare mai mică [5].

4.4.2 Permeabilitatea magnetică a materialului

Acest factor afectează controlul cu curenți turbionari doar în cazul în care piesa analizată este feromagnetică. Permeabilitatea magnetică a unui material feromagnetic nu are un comportament liniar în funcție de intensitatea câmpului magnetic aplicat. Se poate observa, în figura 12, că permeabilitatea magnetică prezintă o variație puternică pentru câmpuri magnetice de până la aproximativ 3 kA/m, iar apoi comportamentul acesteia este aproape liniar.

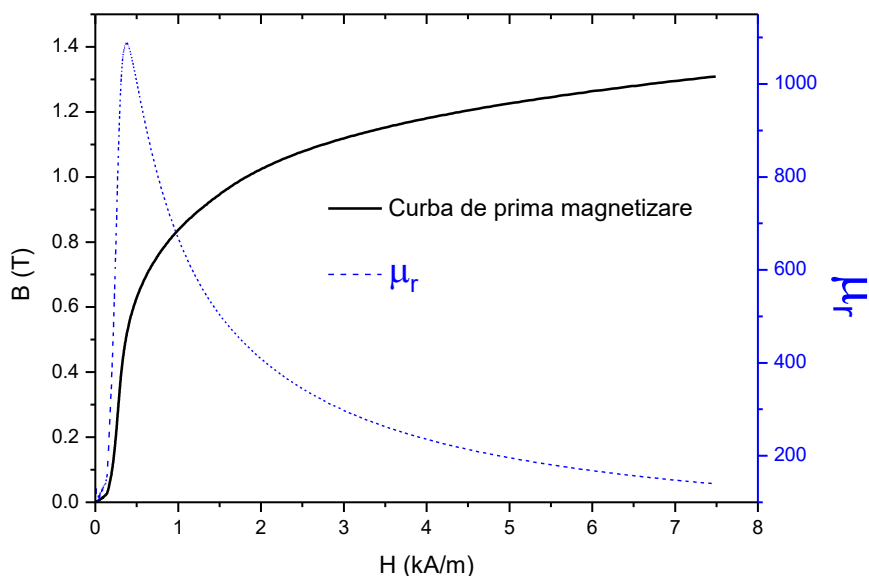


Figura 12. Curba de primă magnetizare (linie continuă) și variația permeabilității magnetice relative (linie întreruptă) a unui material feromagnetic.

Odată cu creșterea permeabilității magnetice are loc și creșterea fondului (zgomotului) măsurătorii, ca urmare a variației permeabilității, conducând la mascarea semnalului dat de curenții turbionari. Acest fenomen este mai pronunțat cu cât adâncimea semnalului de interes este mai mare (semnalul dat de curenții turbionari din profunzime) și deci putem concluziona că, creșterea permeabilității magnetice conduce la diminuarea adâncimii efective de penetrare a curenților turbionari. Această concluzie reiese foarte ușor și din analiza formulei de calcul a adâncimii standard de penetrare (formula 9). O metodă de a limita influența permeabilității asupra examinării cu curenți turbionari o reprezintă magnetizarea la saturație a materialului supus examinării. Permeabilitatea magnetică relativă a unui material magnetic saturat este scăzută așa cum se poate observa și din figura 12. O altă metodă de a diminua efectul variației permeabilității magnetice, respectiv de a crește adâncimea de penetrare a curenților turbionari în cazul analizării unui material feromagnetic, o reprezintă folosirea unor frecvențe mai scăzute (de ordinul sutelor de kHz).

4.4.3 Frecvența curentului din bobina de excitație

În cadrul controlului nedistructiv cu curenți turbionari se utilizează o gamă largă de frecvențe pentru curentul din bobina de excitație, frecvențe cuprinse în domeniul 50 Hz – 10 MHz (în mod uzual se folosesc frecvențele din domeniul 1 kHz– 500 kHz). Odată cu creșterea frecvenței, are loc și creșterea sensibilității metodei în detecția defectelor de suprafață, permițând astfel detectarea defectelor de dimensiuni din ce în ce mai mici. Acest lucru se datorează concentrării curenților turbionari (creșterii densității curenților turbionari) în stratul superficial al probei, așa cum este prezentat în figura 13. Odată cu scăderea frecvenței are loc creșterea adâncimii de penetrare a curenților turbionari, permițând detectarea unor defecte de la adâncimi mai mari din probă. Scăderea frecvenței implică și deplasarea bobinei de detecție (a senzorului) cu viteza mai redusă pe suprafața examinată, pentru a permite formarea curenților turbionari în profunzime și deci pentru a putea scana întreaga suprafață.

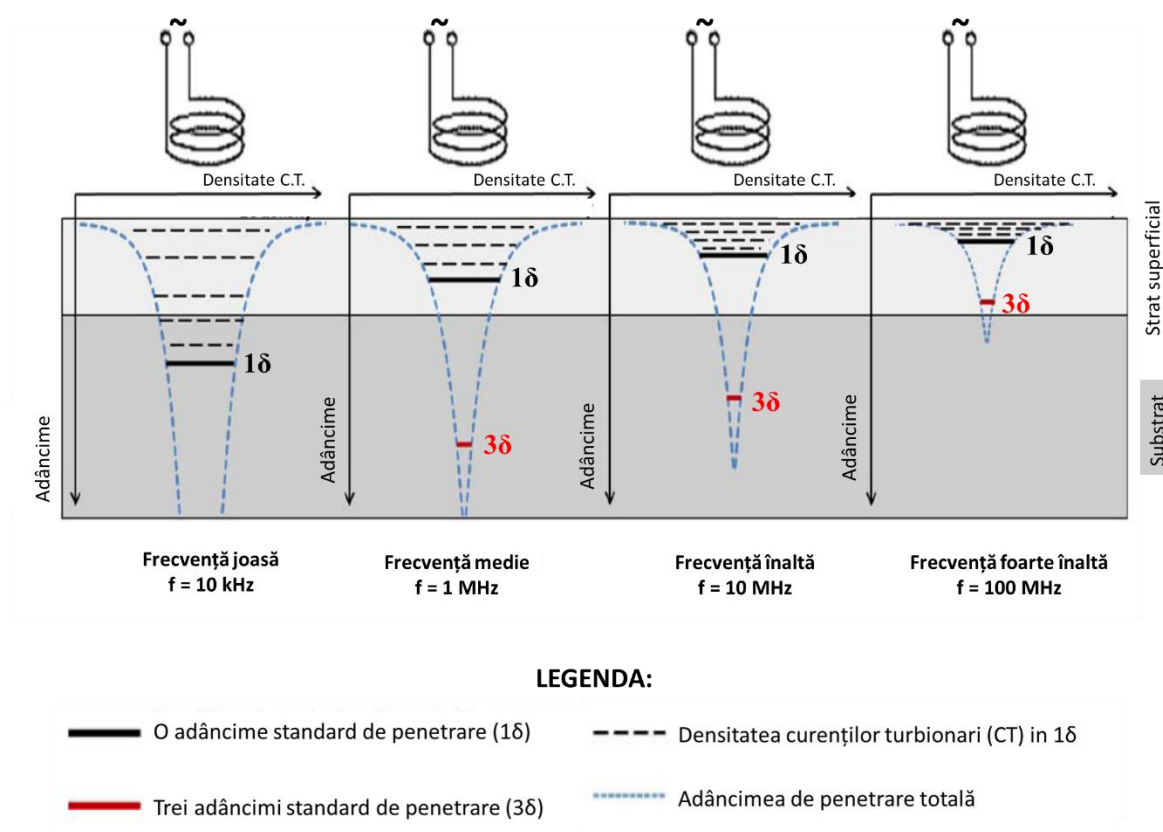


Figura 13. Influența frecvenței curentului din bobina de excitație asupra adâncimii de pătrundere și a densității curenților turbionari într-un material [8].

Frecvența curentului din bobina de excitație, necesară atingerii unei anumite adâncimi de penetrare pentru un anumit material, se poate calcula pe baza relației 9 sau folosind diverse tabele sau grafice (vezi figura 10), în care sunt indicate adâncimile de penetrare în funcție de frecvență. Valorile frecvenței calculate sau preluate din tabele/grafice trebuie privite ca valori orientative, frecvența optimă fiind determinată experimental în cele mai multe cazuri. Frecvența curentului de excitație poate fi utilizată pentru a "regla" adâncimea de penetrare a curenților turbionari. De exemplu, în timpul controalelor de întreținere periodică efectuată pe tuburile subțiri folosite la schimbătoarele de căldură, generatoare de aburi, etc., este adesea necesar să se cunoască poziția unui defect în raport cu suprafața interioară și exterioară a produsului. Discriminarea se poate face prin utilizarea curenților de excitație cu frecvențe foarte diferite, tehnica denumindu-se detecție multifrecvență.

Să luăm în considerare exemplul din figura 14, în care o bobină ce se deplasează în interiorul unui tub este alimentată cu două tipuri de curenți alternativi, diferența dintre aceștia fiind frecvența lor. Cele două frecvențe sunt astfel alese încât $f_1 \gg f_2$. Defectele ce se vizează a fi detectate sunt cele trei cratere de coroziune marcate în figură cu 1, 2 și 3, situate în vecinătatea suprafeței interioare, și o fisură longitudinală marcată cu 4, situată în vecinătatea suprafeței exterioare.

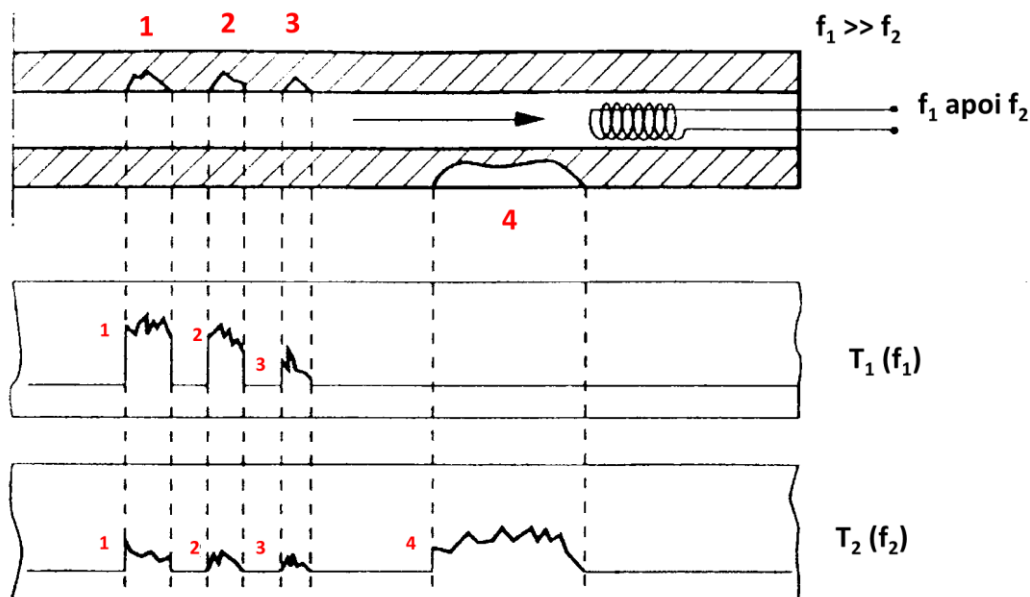


Figura 14. Principiul de bază a detecției multifrecvență [3].

Curenții turbionari de înaltă frecvență f_1 vor fi concentrați în vecinătatea suprafeței interioare a tubului, datorită efectului pelicular, în timp ce curenții de frecvență mai scăzută f_2 vor penetra întreaga grosime a peretelui tubului. În aceste condiții, în cadrul testului T_1 folosind frecvența înaltă f_1 vor fi detectate defectele 1, 2 și 3 iar în cazul testului T_2 cu frecvență scăzută va fi detectat și defectul 4. Se poate observa că în cazul testului T_2 defectele 1, 2 și 3 sunt detectate, dar intensitatea indicației este mult mai mică decât în cazul testului T_1 , ceea ce face dificilă sau, în anumite situații, chiar imposibilă observarea lor. Compararea înregistrărilor realizate în cadrul testului T_1 și T_2 permite discriminarea dintre defectele situate pe peretele interior și cele situate pe peretele exterior a piesei.

4.4.4 Designul senzorului

Caracteristica cea mai importantă în testarea cu curenți turbionari este modul în care curenții turbionari sunt induși în material și apoi detectați de senzor sau sondă. Acest lucru depinde în mare măsură de designul sondei. Sondele pot conține una sau mai multe bobine, un miez magnetic și pot fi ecranate sau nu. Toate au un efect important asupra sondei, dar proiectarea și realizarea bobinei este pasul crucial pentru a obține rezultate optime. Bobina este alcătuită dintr-o sârmă de cupru (în general) înfășurată elicoidal în jurul lungimii unui element de suport. Scopul principal al suportului este de a asigura o rigiditate suficientă bobinei pentru a preveni deformarea acesteia. Suportul are formă de tub sau inel și este fabricat din materiale dielectrice. Regiunea din interiorul suportului se numește miez, acesta poate consta fie dintr-un material solid, de obicei o ferită magnetică moale, fie din aer.

Sârma folosită la realizarea unei sonde pentru controlul cu curenți turbionari este de obicei realizată din cupru, sau din alte metale neferoase, pentru a evita efectele histerezisului magnetic. Înfășurarea are de obicei mai mult de un strat, astfel încât să crească valoarea

inductanței bobinei. Cu cât este mai mare inductanța unei bobine (L), la o anumită frecvență, cu atât este mai mare sensibilitatea examinării cu curenți turbionari.

Adâncimea de penetrare și sensibilitatea unei examinări cu curenți turbionari sunt influențate de designul senzorului (sondei). În general, dacă se dorește adâncime de penetrare mare trebuie ținut cont că densitatea curenților turbionari va fi una mică, și sensibilitatea la defecte de dimensiuni mici va fi mică. Pe de alta parte, dacă se dorește sensibilitate crescută la defecte de dimensiuni mici, aceasta va fi obținută doar în cazul în care densitatea curenților turbionari este mare dar, în acest caz, adâncimea de pătrundere va fi mică. Ca regula de principiu se consideră că adâncimea de penetrare a curenților turbionari este limitată la o adâncime egală cu diametrul bobinei, în timp ce diametrul bobinei trebuie să fie mai mic sau egal cu dimensiunea cea mai mică a discontinuității ce trebuie detectată [5].

4.4.5 Distanța piesa-senzor (Lift-off)

Când o bobină este parcursă de un curent electric alternativ și ținută în aer, impedanța bobinei are o anumită valoare. Pe măsură ce bobina este deplasată mai aproape de un material conducător de electricitate, valoarea inițială a impedanței se va schimba, pe măsură ce câmpul magnetic va intersecta suprafața conductorului.

Deoarece câmpul bobinei are intensitate din ce în ce mai mare, pe măsură ce ne apropiem de bobina, valoarea impedanței va continua să se schimbe până când bobina va ajunge în contact cu materialul conducător de electricitate. Pe de altă parte, odată ce bobina se află pe suprafața conductorului, orice mică variație a distanței dintre bobină și conductor va induce o schimbare a impedanței bobinei, conducând fie la indicații false, fie la mascarea prezenței unor defecte.

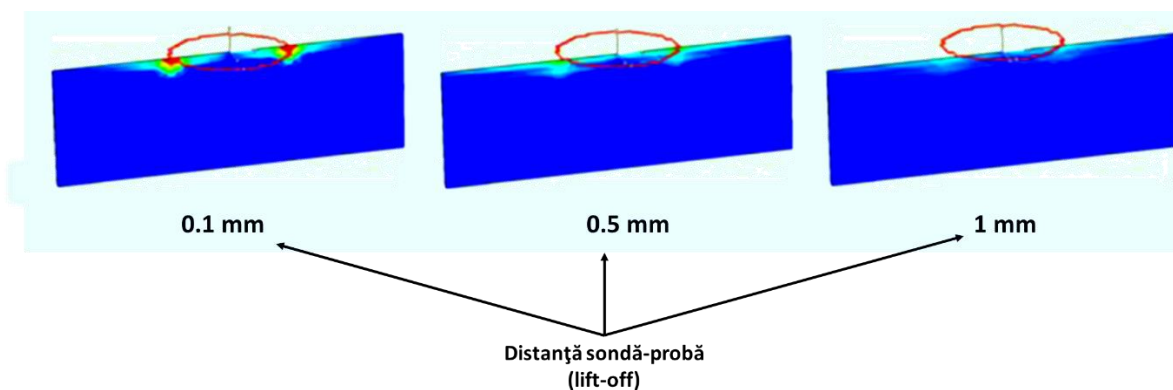


Figura 15. Influența distanței dintre sondă și probă (material) asupra densității curenților turbionari [9].

În același timp, densitatea fluxului magnetic produs de o bobină scade exponențial cu distanța față de bobină. Cu cât distanța dintre bobină și material este mai mare cu atât densitatea curenților turbionari va fi mai mică și deci sensibilitatea măsurătorii va fi mai mică. Acest lucru se poate observa în figura 15, care prezintă o modelare a densității curenților turbionari induși de o bobină, situată la 0.1, 0.5 și 1 mm față de suprafața probei.

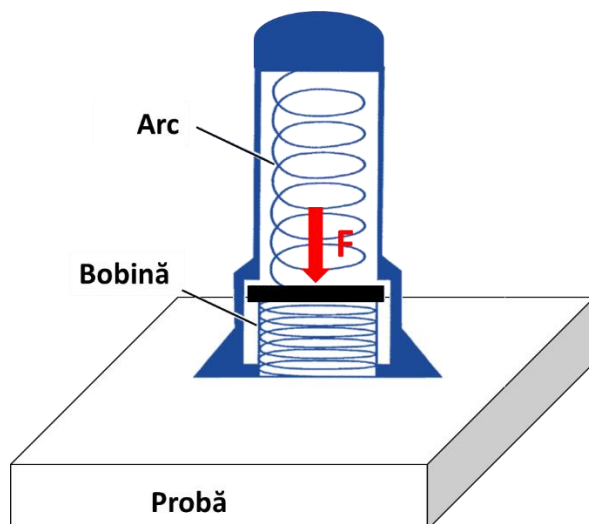


Figura16. Reprezentarea schematică a unei sonde cu arc pentru minimizarea efectului lift-off.

Pentru a minimiza pe cât posibil distanța dintre sondă și proba analizată, ca urmare a unei manipulări defectuoase a acesteia, sau a vibrațiilor probei (wobbling), există sonde în care bobina de excitație/detecție este montată într-un corp cilindric și presată constant înspre suprafața examinată cu ajutorul unui arc (similar cu un palpator). Reprezentarea schematică a unei astfel de sonde este prezentată în figura 16.

4.5 Tipuri de senzori pentru control nedistructiv cu curenți turbionari

Elementul cheie al unui echipament de control nedistructiv cu curenți turbionari îl reprezintă sonda (bobina de control). Aceasta are rolul de a traduce în variații de tensiune la borne sau de impedanță orice modificare a caracteristicilor piesei examinate. Din punct de vedere al modului de funcționare, senzorii se împart în [10]:

- senzori absoluți;
- senzori diferențiali.

În funcție de configurația senzorilor, de modul de așezare a bobinelor în raport cu suprafața probei, senzorii se împart în [10]:

- senzori de trecere;
- senzori interiori;
- senzori aplicați.

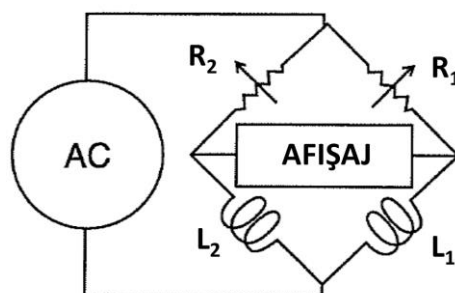


Figura 17. Circuitul unei punți folosite pentru a realiza conexiunea dintre bobina de excitație/detecție și echipamentul de măsură.

În marea majoritate a echipamentelor de control cu curenți turbionari, conexiunea dintre bobina de excitație/detecție și echipamentul de măsură, se realizează prin intermediul unei punți. Punțile sunt capabile să pună în evidență cele mai mici variații ale impedanței unei bobine. La începutul măsurătorii, puntea este echilibrată de către operator prin intermediul rezistențelor variabile R_1 și R_2 , pentru a avea un semnal de referință. În timpul măsurătorii, orice dezechilibrare a punții este citită și indicată de către echipamentul de măsură.

4.5.1 Senzorii absoluți

În cazul senzorilor absoluți (figura 18) crearea câmpului magnetic alternativ (câmpul magnetic primar) și detecția câmpului magnetic secundar, produs de curenții turbionari din probă, se realizează cu o singură bobină.

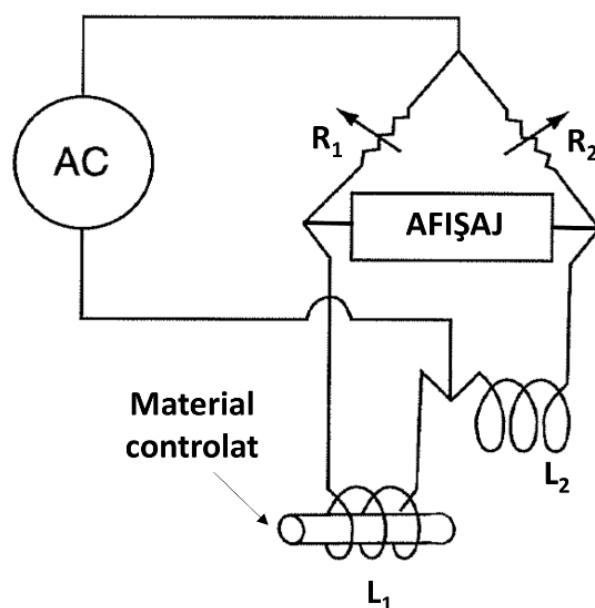


Figura 18. Senzor absolut pentru controlul nedistructiv cu curenți turbionari [5].

Montajul în punte a acestor senzori presupune existența unei de-a doua bobine (L_2), care nu se află în vecinătatea materialului (nu este influențată de material), pentru a echilibra puntea. Acest tip de senzori sunt foarte sensibili la orice modificare a curenților turbionari din probă. În același timp, acești senzori sunt și foarte sensibili la modificarea distanței senzor-probă sau la temperatura probei.

4.5.2 Senzorii diferențiali

Aceștia sunt constituiți din două bobine identice legate în opoziție. Un astfel de montaj poate fi folosit în două moduri. În primul mod (figura 19a), cele două bobine sunt plasate pe materialul controlat iar ceea ce se obține este, de fapt, o comparație între două porțiuni adiacente ale aceluiași material. Acest mod de lucru este mai puțin sensibil la modificarea distanței senzor-probă sau a temperaturii probei. Un dezavantaj major fiind incapacitatea acestuia de a pune în evidență defecte care sunt detectate simultan de cele două bobine, cum ar

fi o fisură lungă. De asemenea, variațiile lente de diametru ale piesei analizate sunt greu, dacă nu imposibil, de observat. Acest tip de montaj este foarte potrivit pentru a pune în evidență fisuri de dimensiuni mici.

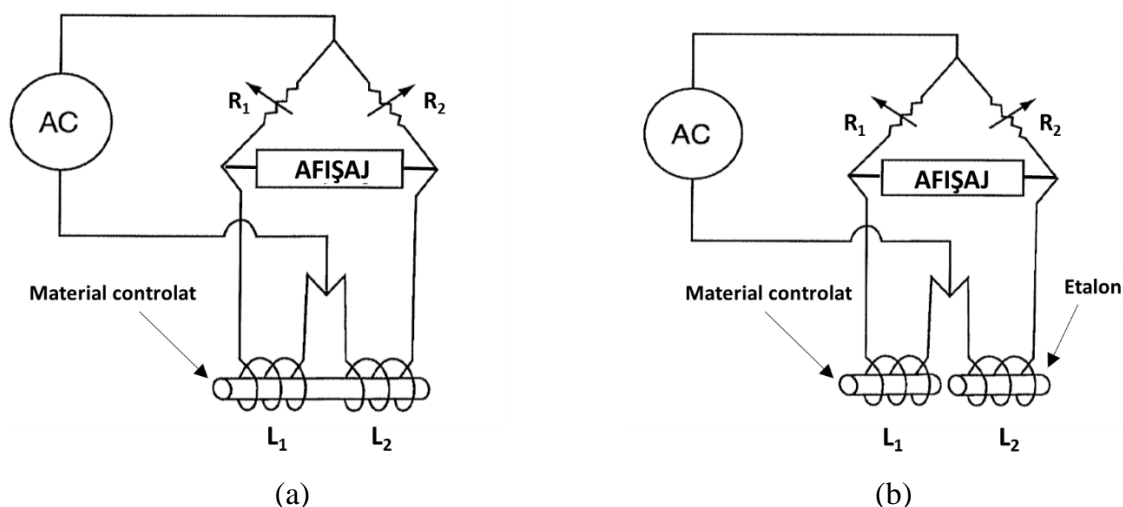


Figura 19. Senzori diferențiali pentru controlul nedistructiv cu curenți turbionari [5].

În cel de-al doilea mod (figura 19b), o bobină este plasată pe materialul examinat, iar cealaltă pe un material etalon (referință externă), lipsit de defecte. Dacă materialul examinat este lipsit de defecte, tensiunea de ieșire a celor două bobine este egală și, datorită legării acestora în opozitei, tensiunea rezultată va fi nulă. Dacă în materialul examinat există defecte, tensiunea de la bornele celor două bobine este diferită, rezultând astfel o tensiune totală diferită de zero.

Atât senzorii sau bobinele absolute cât și cele diferențiale pot fi folosite în montaje în simplu sau dublu aranjament. În simplu aranjament aceeași bobină îndeplinește atât funcția de excitație cât și funcția de detecție. În dublu aranjament, o bobină (sau un sistem de bobine, în cazul diferențial) este folosită pentru a induce curenții turbionari în probă, iar altă bobină este folosită pe post de detector. Cele două bobine sunt suprapuse iar, de regulă, bobina de detecție este bobina cea mai apropiată de probă.

4.5.3 Senzori de trecere

Aceștia înconjoară pe întreaga circumferință materialul analizat și sunt folosiți cu precădere pe liniile de producție a sârmelor, țevilor, barelor etc. Este important ca materialul testat să se afle în centrul bobinei, pentru a asigura testarea cu aceeași sensibilitate a întregii sale circumferințe. Datorită orientării curenților turbionari, în centrul materialului aceștia se vor anula reciproc, ceea ce face ca defectele situate în centrul semifabricatului să nu fie detectabile. Un alt aspect este acela că locul exact al defectului pe circumferința unui semifabricat nu poate fi determinat cu acest tip de senzor deoarece, el scanează întreaga circumferință simultan. Pentru a determina locul exact al unui defect se pot utiliza senzori rotitori, care sunt de fapt senzori aplicați, care execută o mișcare de rotație în jurul semifabricatului, care execută la rândul său o mișcare de avans.

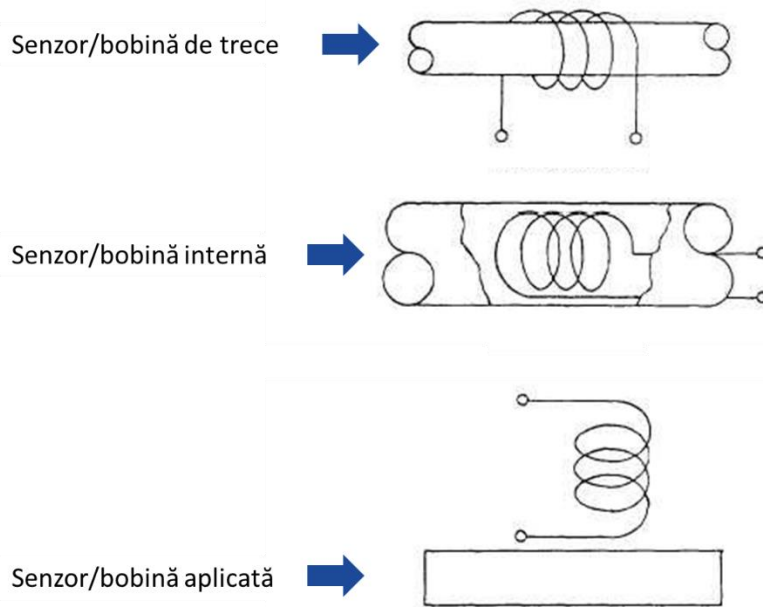


Figura 20. Reprezentarea schematică a senzorilor/bobinelor de trecere, interne și aplicate.

Un alt aspect care influențează sensibilitatea examinării cu acest tip de bobină este factorul de umplere notat cu η . Pentru senzori de trecere acesta este egal cu raportul dintre aria secțiunii transversale a probei și aria secțiunii transversale a bobinei.

$$\eta_{trecere} = \frac{\frac{\pi D_e^2}{4}}{\frac{\pi D_b^2}{4}} = \left(\frac{D_e}{D_b}\right)^2 \quad (10)$$

unde D_e este diametrul exterior al piesei și D_b este diametrul interior al bobinei.

4.5.4 Senzori interni

Senzorii interni sau bobinele interne se folosesc pentru examinarea produselor goale, de tipul țevelor sau tuburilor, fiind introduși în interiorul acestora. La fel ca senzorii de trecere, senzorii interni scanează întreaga circumferință a semifabricatului, fiind imposibilă determinarea cu exactitate a poziției defectului pe circumferința probei. Și în această situație se folosesc senzori concepuți special pentru determinarea poziției defectului. Factorul de umplere joacă și în acest caz un rol important influențând sensibilitatea examinării. În cazul senzorilor interni acesta se calculează cu relația:

$$\eta_{intern} = \frac{\frac{\pi D_b^2}{4}}{\frac{\pi D_i^2}{4}} = \left(\frac{D_b}{D_i}\right)^2 \quad (11)$$

unde D_i este diametrul interior al piesei și D_b este diametrul exterior al bobinei.

4.5.5 Senzori aplicați

Senzorii aplicați sunt, în general, special concepuți pentru a putea fi manipulați de către un operator. Designul acestora este realizat de așa manieră încât să satisfacă cerințele unei anume aplicații, motiv pentru care diversitatea acestor senzori o depășește cu mult pe cea a senzorilor interni sau de trecere.

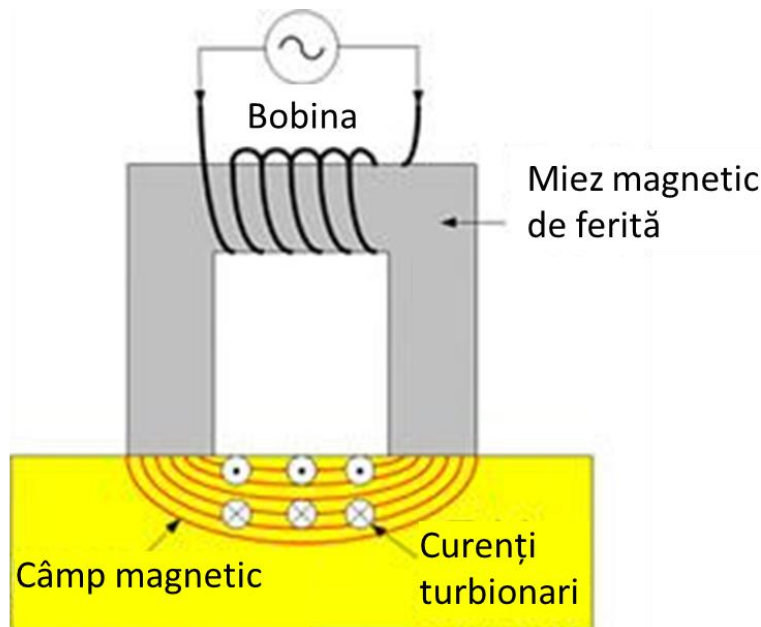


Figura 21. Senzor aplicat în formă de U pentru detecția defectelor dispuse paralel cu suprafața probei examinate [adaptată după 11].

În general, acești senzori sunt concepuți în așa fel încât axa bobinei de excitație/detecție să fie perpendiculară pe suprafața piesei examinate. Acești senzori sunt sensibili la defecte orientate perpendicular pe suprafața piesei examinate. Pentru punerea în evidență a defectelor orientate paralel cu suprafața piesei se folosesc senzori care conțin două bobine înfășurate pe un miez magnetic (de obicei din ferită) în formă de U. Pe capetele miezului magnetic se vor forma poli magnetici, câmpul magnetic închizându-se între acești poli și deci paralel cu suprafața examinată. Curenții turbionari formați de acest câmp vor fi perpendiculari pe suprafața examinată, oferind astfel sensibilitate la defectele orientate paralel cu suprafața probei.

4.6 Diagrama impedanței pentru un material neferomagnetic și feromagnetic

Atunci când o bobină parcursă de un curent electric alternativ este adusă în apropierea unui material metalic, inductanța (L) și rezistența (R) acesteia se modifică, ca urmare a efectului curenților turbionari asupra bobinei. Modificarea inductanței și a rezistenței bobinei depind de următorii factori:

- frecvența curentului alternativ ce trece prin bobină;
- designul bobinei (geometrie și dimensiuni);
- geometria, dimensiunile și caracteristicile fizice ale obiectului.

Pentru a putea trasa o diagramă cu caracter general, care să stabilească legătura dintre factorii mai sus menționați, se aplică un procedeu de normare asupra reactanței și rezistenței. Rezulta astfel:

- Reactanța normată (X_n), care reprezintă raportul dintre reactanța bobinei în prezența obiectului metalic (ωL) și reactanța bobinei în aer (ωL_0), sau în gol (când bobina se afla suficient de departe de materialul metalic, astfel încât curenții turbionari induși să nu afecteze caracteristicile bobinei).

$$X_n = \frac{\omega \cdot L}{\omega \cdot L_0} \quad (12)$$

- Rezistența normată (R_n), care reprezintă raportul dintre rezistența bobinei în prezența materialului metalic și reactanța bobinei în gol.

$$R_n = \frac{R}{\omega \cdot L_0} \quad (13)$$

unde L și R reprezintă inductanța și rezistența bobinei în prezența materialului metalic. Variația rezistenței normate se definește conform relației:

$$\Delta R_n = \frac{R - R_0}{\omega \cdot L_0} \quad (14)$$

unde L_0 și R_0 reprezintă inductanța și rezistența bobinei în gol.

4.6.1 Cazul materialului neferomagnetic

Vom considera că avem o bobină cilindrică lungă umplută cu un material neferomagnetic. Reamintim că, în cazul acestor materiale, permeabilitatea magnetică relativă este considerată a fi egală cu 1 ($\mu_r = 1$). Se poate demonstra că, pentru materialul cilindric, în funcție de caracteristicile lui geometrice și fizice, se poate stabili o frecvență limită ce se poate calcula cu relația 15.

$$v_g = \frac{5066}{\mu_r \cdot \sigma \cdot D^2} \quad (15)$$

unde v_g este frecvența limită (Hz), μ_r este permeabilitatea magnetică relativă a materialului, σ este conductivitatea electrică ($\text{m}/\Omega\text{mm}^2$) și D este diametrul piesei cilindrice (cm).

Diagrama impedanței normate, $X_n = f(\Delta R_n)$, pentru cazul cilindrului neferomagnetic care umple complet bobina este prezentată în figura 22 [10]. Dacă intensitatea curentului care trece prin bobină rămâne constantă, în absența și prezența materialului metalic neferomagnetic, se pot scrie următoarele relații:

$$\frac{U_L}{U_{L_0}} = U_{L_n} = \frac{\omega \cdot L}{\omega \cdot L_0} = X_n \quad (16)$$

$$\frac{U_R}{U_{R_0}} = U_{R_n} = \frac{R}{\omega \cdot L_0} = R_n \quad (17)$$

Din aceste relații rezultă că diagrama impedanței normate coincide cu diagrama tensiunilor normate. Așadar, se pot obține informații despre piesa controlată fie prin intermediul impedanțelor, fie prin intermediul tensiunilor.

Defazajul dintre tensiunile normate, sau defazajul dintre curentul și tensiunea de la bornele bobinei de control, este identic cu defazajul impedanței. Se consideră un punct P din diagrama impedanței sau tensiunii normate, corespunzând unui raport dintre frecvența curentului cu care este alimentată bobina și frecvența limită (v/v_g), denumit raport de similitudine și calculat cu relația:

$$\frac{v}{v_g} = \frac{\mu_r \cdot v \cdot \sigma \cdot D^2}{5066} \quad (18)$$

Pentru valori egale ale v/v_g caracterul distribuției curenților turbionari și al câmpurilor magnetice în piesele controlate va fi același. Mărima segmentului OP arată cu cât a scăzut impedanța sau tensiunea la bornele bobinei față de valoarea în gol. Unghiul $\Delta\varphi$ arată defazajul dintre tensiunea în gol și cea în prezența piesei metalice. Invers, dacă se determină prin măsurători valoarea impedanței și a defazajului, din diagrama se afla raportul v/v_g și, în final, valoarea frecvenței limita (v_g) care furnizează informații despre obiectul supus controlului.

Analizând diagrama impedanței normate din figura 22, se pot trage următoarele concluzii:

- Reactanța normată a bobinei scade continuu cu creșterea raportului v/v_g ;
- Variația rezistenței normate a bobinei crește, atingând un maxim, apoi scade atingând valoarea ei inițială.

Această variație se explică astfel: când frecvența și conductivitatea electrică cresc, câmpul magnetic al bobinei pătrunde din ce în ce mai puțin în material, datorită efectului pelicular. Prin urmare, câmpul magnetic creat de curenții turbionari este din ce în ce mai mare, ceea ce face ca inductanța și, prin urmare, reactanța normată a bobinei să tindă la zero. Datorită dezvoltării în material a curenților turbionari, apar pierderi prin efect Joule care se manifestă prin încălzirea materialului și care cresc odată cu creșterea frecvenței. Suprapunerea acestor pierderi peste pierderile date de rezistența internă a bobinei se manifestă ca și cum rezistența bobinei ar crește. Pierderile prin efect Joule depind de frecvență dar și de volumul de material în care acționează curenții turbionari. Datorită volumului mare de material în care se dezvoltă curenții turbionari la frecvențe joase, aceste pierderi vor crește la început, vor ajunge la un maxim și apoi vor scădea ca urmare a micșorării volumului în care acționează curenții turbionari. Rezistența aparentă a bobinei va urmări aceeași variație (crește, atinge un maxim și apoi scade).

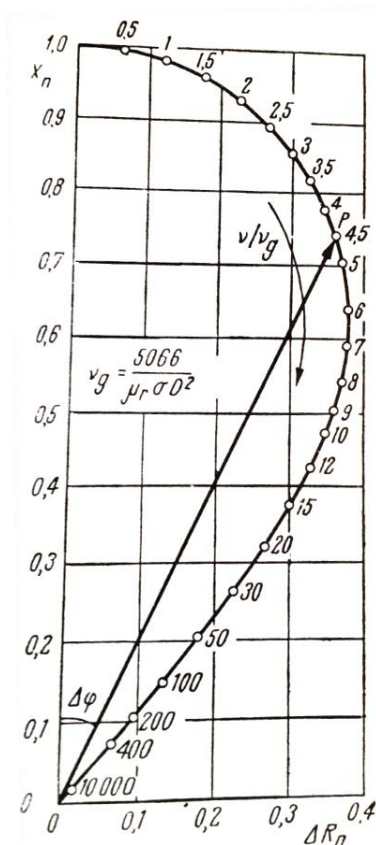


Figura 22. Diagrama impedanței normale, $X_n = f(\Delta R_n)$, pentru cazul cilindrilor neferomagnetici care umplu complet bobina [10].

În cazul în care obiectul nu umple complet bobina, în planul impedanței sau tensiunii normale se obține o familie de curbe (similare cu curba din figura 22), în funcție de factorul de umplere (pătratul raportului dintre diametrul exterior al piesei și diametrul interior al bobinei). Frecvența optimă de lucru corespunde unui raport v/v_g pentru care ΔR_n se află în zona de maximum.

4.6.2 Cazul materialului feromagnetic

În cazul materialelor feromagnetice $\mu_r \gg 1$, curba va începe, pentru $v/v_g = 0$, nu din punctul $X_n = 1$ ci din punctul $X_n = \mu_r$ pentru cazul în care obiectul umple în întregime bobina (factor de umplere egal cu 1). Diagrama impedanței pentru cilindrii feromagnetici, cu diferite permeabilități magnetice relative, care umplu în întregime bobina este prezentată în figura 23.

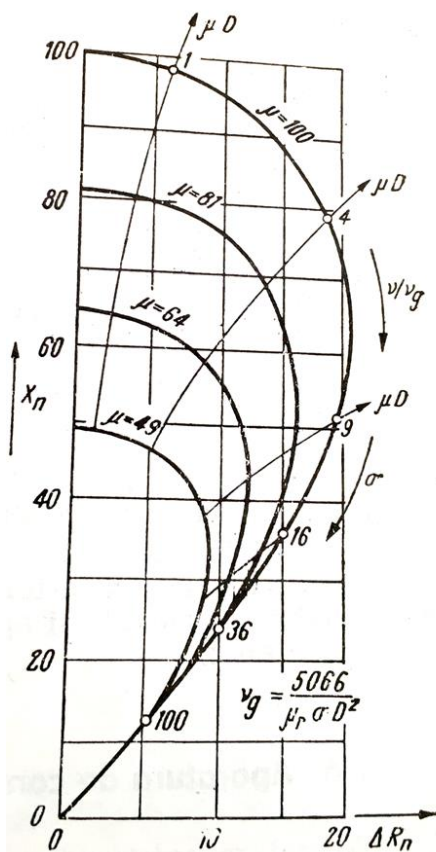


Figura 23. Diagrama impedanței normale, $X_n = f(\Delta R_n)$, pentru cazul cilindrii feromagnetice care umple complet bobina [10].

Așa cum se observă, direcțiile de variație ale diametrului și permeabilității relative coincid tot timpul, neputând fi separate. În această situație, realizarea controlului selectiv pe baza variației proprietăților legate de μ_r devine imposibilă, deoarece variațiile valorii diametrului vor influența, în acest caz, întotdeauna tensiunea electromotoare a bobinei. Pentru a înlătura efectul variației permeabilității materialului, soluția care se alege este saturarea materialului prin aplicarea unui câmp magnetic continuu prin intermediul unei bobine parcurse de un curent continuu, așa cum este prezentat în figura 12.

4.7 Avantajele și dezavantajele controlului nedistructiv cu curenți turbionari

Principalele avantaje ale acestui tip de control nedistructiv sunt:

- este o tehnică sensibilă la defectele de suprafață;
- pot fi puse în evidență defecte de dimensiuni mici;
- oferă informații despre profunzimea la care se află defectul;
- poate detecta defecte aflate sub straturi de acoperire;
- se pretează automatizării;

- este o tehnică cu un grad ridicat de portabilitate (în special în cazul senzorilor aplicați);
- permite măsurarea cu precizie a conductivității electrice;
- operația de curățare a probei este una sumară;

Principalele dezavantaje ale tehnicii de control nedistructiv cu curenți turbionari sunt:

- se aplică doar în cazul materialelor conducătoare de electricitate;
- dificil sau imposibil de aplicat în cazul pieselor cu geometrie complexă;
- rezultatul este influențat puternic de variații ale permeabilității magnetice;
- detectarea defectelor dispuse paralel cu suprafața necesită senzori speciali;
- necesită interpretarea unui semnal afișat pe ecranul echipamentului;
- indicațiile obținute nu sunt permanente (nu rămân fixate pe suprafața probei).

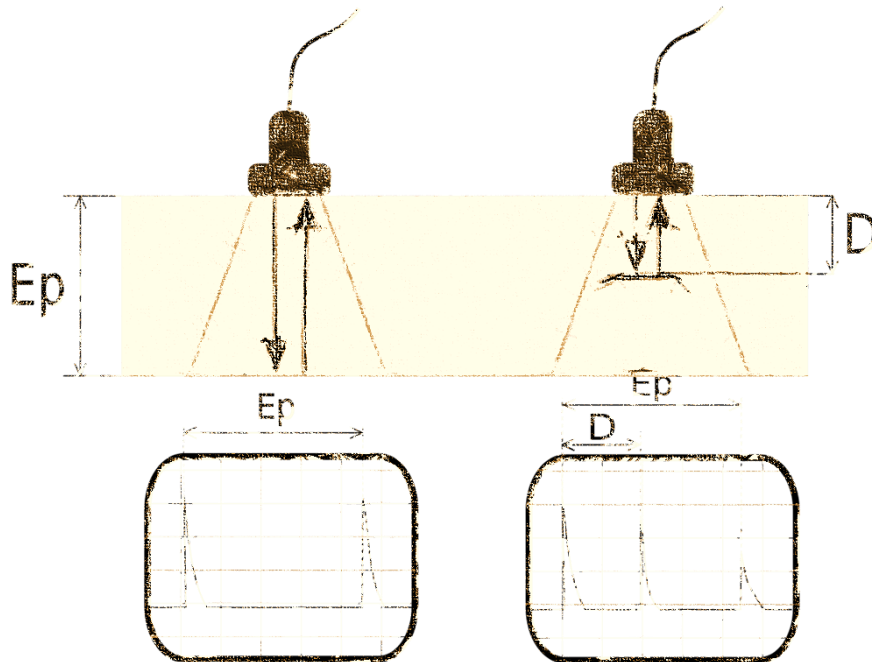
4.8 Bibliografie

- [1] J. Garcia-Martin, J. Gomez-Gil, E. Vázquez-Sánchez, Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing, *Sensors*, 11 (2011) 2525-2565.
- [2] E. Gros, Eddy Current Principle, Eddy Current Inspection Solution, *KontrollTechnik*, May 2015 (disponibil online: <https://www.slideshare.net/EthanGros/tutorial-eddy-current-testing>)*.
- [3] <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/controle/Chapitre-5/Section-1-1.html>*
- [4] <https://www.doerken-mks.de/en/glossary/eddy-current-method-amplitude-sensitive/>*
- [5] C. J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, Editura The McGraw-Hill Companies, Inc. 2001, ISBN: 13: 978-0071777148
- [6] <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/depthcurrentdensity.htm> *
- [7] T. Luthi, *Non-Destructive Evaluation Methods*, 2013, disponibil online: [https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20\(2014\).pdf](https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20(2014).pdf)*
- [8] International Atomic Energy Agency (IAEA), Eddy Current Testing at Level 2, Cod document: IAEA-TECDOC-628.Rev. 2 "Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques, 2011 (disponibil online: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-48_web.pdf) *.
- [9] P. Vilaca, Eddy Current Testing (ET) Technique, Aalto University, Departement of Mechanical Engineering, - notițe de curs 2017 *.
- [10] I. Panaitescu, V. Negulescu, E. Dascalu et al., *Defctoscopie nedistructiva*, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1977.
- [11] K. Peerapong, P. O. Isaratat, P. Bovornchok, A development of swept-frequency eddy current for aging characterization of heat resistant steel, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 55 (2017) 279-287.

* Surse bibliografice disponibile online la data de 08.11.2018

Capitolul 5

Controlul nedistructiv cu ultrasunete



5.1 Introducere

În principiu, controlul nedistructiv cu ultrasunete constă în introducerea unui fascicul de ultrasunete într-un material și analiza perturbațiilor propagării fascicolului în materialul vizat. Datorită caracteristicilor elastice diferite, dintre materialul de bază și un defect anume (fisură, segregare, suflură, etc.), la interfața dintre acestea va avea loc un fenomen de reflexie a ultrasunetelor, ceea ce va permite punerea în evidență, localizarea și măsurarea defectului.

Având în vedere că această tehnică are la bază principiul propagării sunetelor într-un mediu, putem considera că lucrarea „The theory of the sound”, scrisă în două volume (1877 și 1878) de către Lordul Rayleigh, reprezintă fundamentul teoretic al acestei metode, din moment ce prezintă teoria propagării undelor în solide. Un alt moment important în istoria acestei tehnici de control nedistructiv a fost cel al descoperirii, în 1880, de către frații Pierre și Jaques Curie, a efectului piezoelectric direct într-un cristal de cuarț. Aceștia au constatat că aplicarea unor solicitări mecanice asupra unor cristale de cuarț va conduce la apariția unor sarcini electrice pe suprafața cristalului. Un an mai târziu, Gabriel Lippmann pune în evidență și efectul piezoelectric invers, care constă în obținerea unor deformații a unor cristale, atunci când pe suprafața acestora se aplică o sarcină electrică [1].

Încă din anul 1912, după scufundarea Titanicului, a apărut ideea că undele sonore ar putea fi folosite pentru detectarea aisbergurilor din apă. În timpul primului război mondial, aceeași idee a stat la baza dezvoltării sonarului pentru detectarea submarinelor. Sistemul de tip puls-ecou, dezvoltat în timpul primului război mondial, a fost ulterior utilizat pentru studiul oceanelor și pentru pescuitul industrial (detectarea bancurilor de pești).

În 1929, S.Y. Sokolov a fost primul care a sugerat utilizarea undelor ultrasonice pentru a detecta discontinuitățile prezente în anumite materiale (fontă, oțel). În 1935, el a descris designul traductoarelor piezoelectrice pentru generarea și detectarea ultrasunetelor, introducând și ideea de a avea un mediu de cuplare între traductor și materialul investigat. Metoda descrisă de Sokolov se bazează pe analiza unui fascicul continuu de ultrasunete transmise printr-un material, cu ajutorul unui traductor cu cristal piezoelectric, folosind mercurul drept agent de cuplare. Folosirea unui fascicul continuu de ultrasunete pentru investigarea materialului poate conduce la concluzii false, deoarece fasciculul reflectat de pereții probei poate fi în fază sau defazat față de fasciculul incident, ceea ce va conduce la modificarea artificială a intensității fascicolului transmis prin probă [2].

Pentru a înlătura acest neajuns, în 1942 tehnica puls ecou a fost dezvoltată de către D.O. Sproule (Anglia) și F. Firestone. În cadrul acestei tehnici, pulsuri scurte de ultrasunete sunt aplicate materialului la intervale regulate de timp. Între două impulsuri succesive echipamentul analizează și afișează ecourile rezultate ca urmare a reflexiei ultrasunetelor de către defectele prezente în probă. În această etapă de dezvoltare a tehnicii se foloseau doar unde longitudinale. În 1947, D.O. Sproule a realizat primul traductor care folosea doar unde transversale pentru detecția defectelor, această realizare conducând la o creștere semnificativă a utilizării acestui tip de control nedistructiv în diverse domenii [1, 2].

În deceniile ce au urmat, dezvoltarea tehnologiei de control nedistructiv cu ultrasunete s-a axat pe îmbunătățirea capacității acestora de determinare a dimensiunii și poziției defectului, precum și automatizarea și creșterea portabilității echipamentelor.

5.2 Oscilații și unde elastice

Ultrasunetele sunt vibrații ale mediilor elastice cu frecvențe mai mari de 20 kHz, fiind de aceeași natură cu sunetul. Să considerăm un sistem oscilant, precum cel prezentat în figura 1, format dintr-o mulțime de particule legate între ele prin forțe elastice.

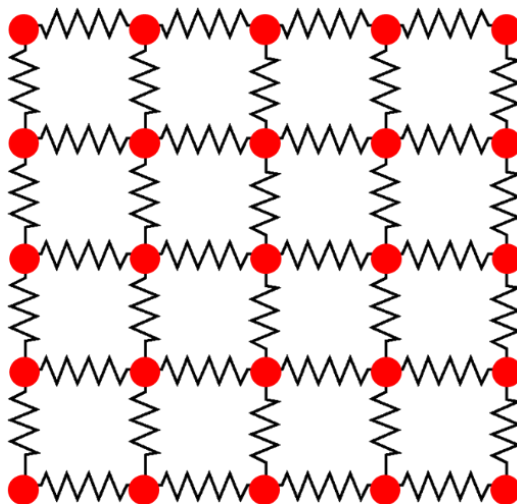


Figura 1. Modelul bidimensional al unui sistem oscilant format din puncte materiale conectate între ele prin forțe elastice.

Este ușor de imaginat că oscilația oricărei particule va fi transmisă celorlalte particule, din aproape în aproape, dând naștere la o undă elastică ce se va propaga în întreaga masă a materialului. Așadar, ansamblul oscilațiilor particulelor unui mediu elastic se numește undă elastică. Acest model descrie destul de bine situația reală a unui material. Acesta este format din atomi între care există forțe elastice de interacțiune. În funcție de frecvența de oscilație, undele elastice se împart în patru categorii astfel [3]:

- infrasunete – sunt unde elastice a căror frecvență de oscilație este mai mică decât 16 Hz;
- Sunete sau unde sonore - sunt unde elastice a căror frecvență de oscilație este cuprinsă în intervalul 16 Hz – 20 kHz;
- Ultrasunete - sunt unde elastice a căror frecvență de oscilație este cuprinsă în intervalul 20 kHz – 10^4 MHz;
- Hipersunete - sunt unde elastice a căror frecvență de oscilație este cuprinsă în intervalul 10^4 MHz – 10^8 MHz.

Undele sonore (la fel ca orice tip de unde) sunt caracterizate de amplitudine, perioadă, frecvență și lungime de undă.

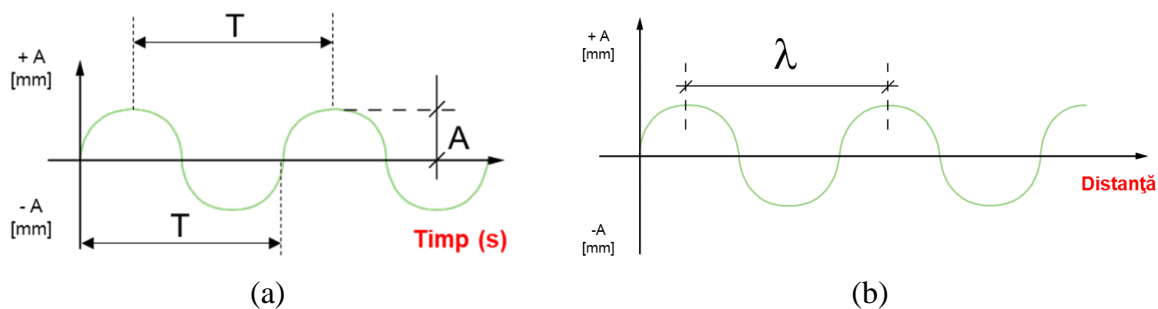


Figura 2. Caracteristicile principale ale unei unde.

Amplitudinea unei unde (figura 2a) reprezintă deviația maximă față de poziția de echilibru a unei particule oscilante și se notează cu „A”. Dacă amplitudinea unei unde este constantă în raport cu timpul spunem că unda respectivă are oscilație neamortizată. Dacă amplitudinea unei unde scade în raport cu timpul spunem că unda respectivă are oscilație amortizată. Perioada unei unde reprezintă timpul necesar pentru realizarea unei oscilații complete (figura 2a) și se notează cu „T”. Frecvența unei unde reprezintă numărul de cicluri complete de oscilație pe care le execută o particulă sau un element de masă într-o secundă. Unitatea de măsură a frecvenței de oscilație este Hertzul (Hz), frecvența se notează cu „f”. Lungimea de undă reprezintă distanța între două puncte succesive de maxim sau de minim dintr-o undă (figura 2b) și se notează cu „ λ ”.

La nivel atomic există multe modele diferite de mișcare vibratoare, cele mai multe fiind irelevante pentru controlul nedistructiv cu ultrasunete. Atunci când un material nu este supus unor tensiuni mecanice de tracțiune sau compresiune superioare limitei sale de elasticitate, particulele sale individuale (atomii) efectuează oscilații elastice. Când particulele unui mediu sunt deplasate din pozițiile lor de echilibru, apar forțe elastice care tind să readucă particulele în poziția de echilibru. În cazul atomilor dintr-un material, aceste forțe sunt forțe de natură electrostatică. Efectul acestor forțe combinat cu inerția particulelor vor conduce la mișcări oscilatorii ale mediului considerat. În solide, în funcție de modul de oscilație al atomilor, undele sonore se pot propaga în patru moduri principale:

Unde longitudinale. Direcția de oscilație a atomilor din material corespunde cu direcția de propagare a undei. Undele longitudinale dau naștere în solide la tensiuni alternative de tracțiune și compresiune, conducând astfel la variații de volum și, prin urmare, la fluctuații locale ale densității materialului.

Unde transversale. Direcția de oscilație a atomilor din material este perpendiculară pe direcția de deplasare a undei. Caracteristic acestui tip de unde este faptul că nu dau naștere la fluctuații locale de densitate în material, precum undele longitudinale. De asemenea, s-a observat că viteza de propagare a undelor transversale este mai mică decât viteza de propagare a undelor longitudinale, în același material (aproximativ jumătate). În figura 3 este prezentată schematic propagarea undelor longitudinale și transversale într-un material.

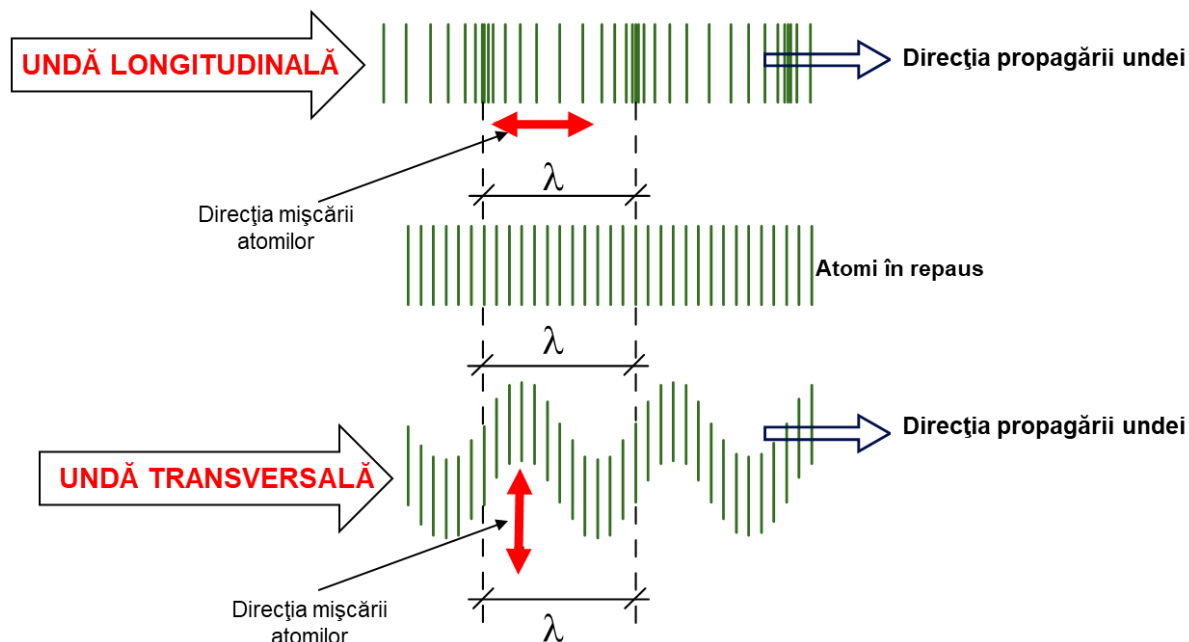


Figura 3. Propagarea undelor longitudinale și transversale într-un material [adaptată după 4].

Unde de suprafață sau unde Rayleigh. În cazul acestui tip de unde, particulele execută o mișcare eliptică în jurul poziției de echilibru (figura 4), axa mare a elipsei fiind perpendiculară pe suprafața materialului. Această mișcare eliptică rezultă din faptul că undele de suprafață sunt o combinație între undele transversale și undele longitudinale. Amplitudinea acestei mișcări scade exponențial cu adâncimea față de suprafață, ceea ce face ca acest tip de unde să fie localizat doar în imediata apropiere a suprafeței materialului investigat. De exemplu, la o adâncime egală cu o lungime de undă, amplitudinea de vibrație a atomilor este mai mică decât 10% din amplitudinea de vibrație a atomilor de la suprafața materialului.

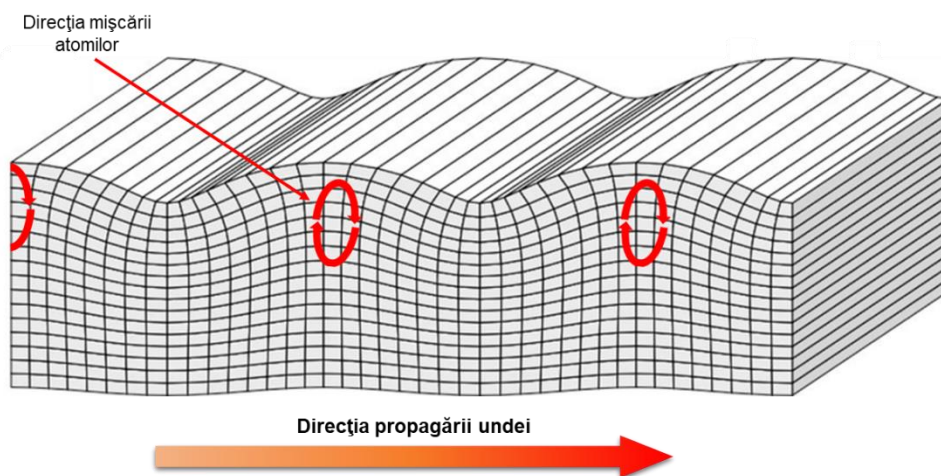


Figura 4. Propagarea undelor de suprafață (unde Rayleigh) [adaptată după 5].

Unde Lamb sau unde de placă. Acest tip de unde sunt similare cu undele de suprafață, diferența constând în faptul că acest tip de unde poate să apară doar în materiale a căror grosime nu depășește câteva lungimi de undă. Undele Lamb sunt vibrații complexe care se propagă paralel cu suprafața de testare pe toată grosimea materialului. Propagarea undelor Lamb

depinde de densitatea și proprietățile elastice ale materialului. Acestea sunt, de asemenea, influențate în mare măsură de frecvența de testare și de grosimea materialului. Undele Lamb sunt generate atunci când unghiul de incidență dintre fascicolul de ultrasunete și suprafața testată are o anumită valoare, pentru care componenta paralelă a vitezei undei în sursă este egală cu viteza undei în materialul de testare. Acest tip de undă se propagă pe distanțe de ordinul metrilor în oțel, fiind astfel utile la scanarea plăcilor, a sârmelor și a tuburilor cu pereți subțiri. Undele Lamb se pot propaga printr-o placă în două moduri:

- *Unde simetrice*: sunt oarecum similare cu undele longitudinale deoarece mișcarea de oscilație în centrul plăcii se face după direcția de propagare a undei (ca niște umflături succesive ce se deplasează în lungul plăcii);
- *Unde asimetrice*: sunt un tip de unde transversale sau de forfecare, la care mișcarea particulelor în centrul plăcii este transversală iar la suprafață este eliptică, ca în cazul undelor Lamb simetrice.

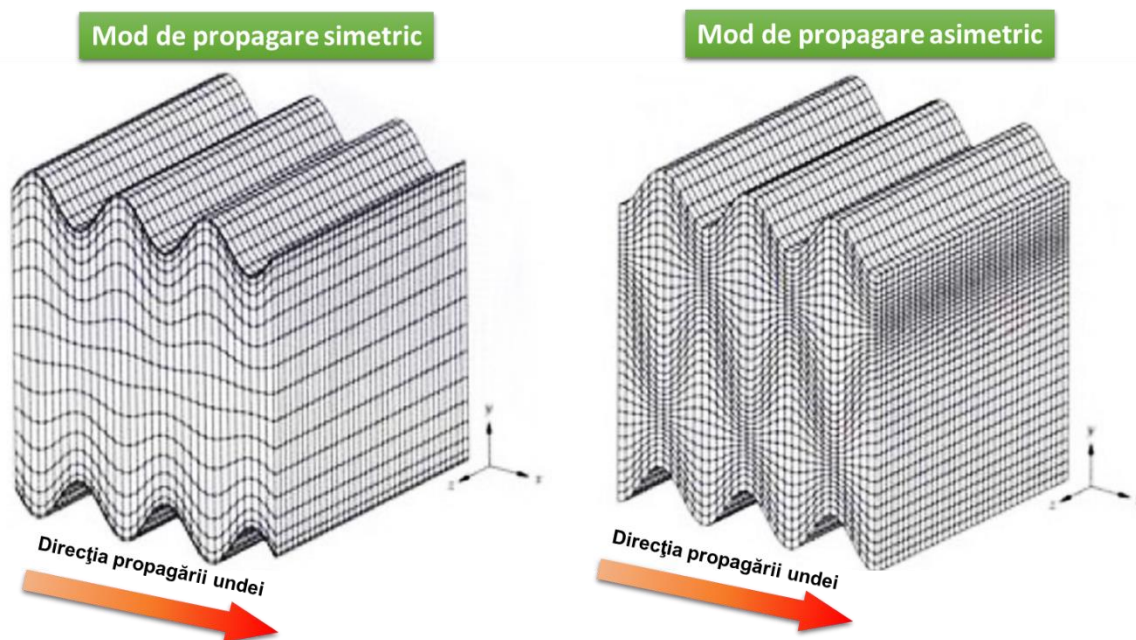


Figura 5. Propagarea undelor Lamb (unde de placă) [adaptat după 5].

Undele Lamb se folosesc îndeosebi pentru testarea componentelor cu pereți subțiri, la controlul dimensional, la verificarea gradului de aderență dintre două straturi sau placi metalice, deoarece sensibilitatea lor de detecție este superioară oricărui tip de unde.

5.3 Fenomene și mărimi specifice propagării undelor prin medii elastice

5.3.1 Interferența undelor

Trebuie să înțelegem ca palpatorul unui echipament de control nedistructiv cu ultrasunete nu emite ultrasunete dintr-un singur punct, ci practic, din fiecare punct de pe suprafața lui. Având în vedere aceasta, trebuie să înțelegem modul în care aceste unde interferează unele cu

celelalte. Prin interferență se înțelege modul în care două sau mai multe unde se compun într-un punct din mediu ca urmare a suprapunerii acestora.

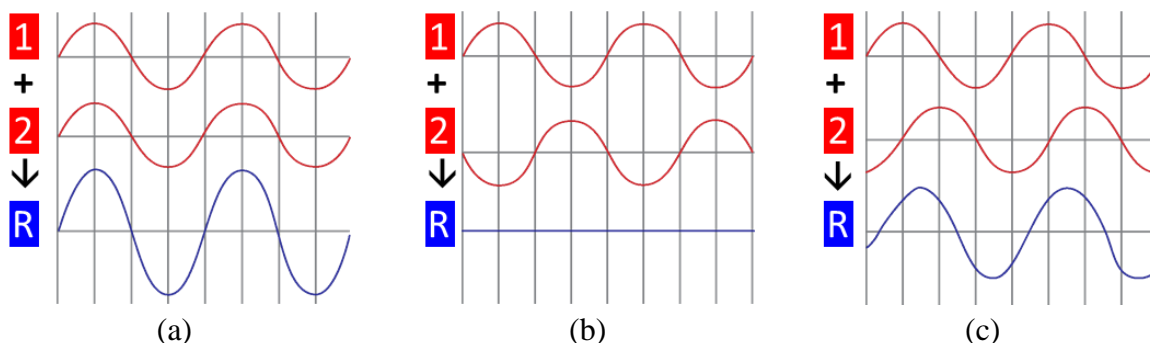


Figura 6. Moduri de interferență a undelor. 1 și 2 sunt cele două unde considerate iar R este unda rezultată.

Să considerăm două unde care se propagă într-un material și interferează una cu cealaltă. Amplitudinea vibrației particulelor mediului prin care acestea se propagă va fi egală cu suma celor două unde (figura 6). Dacă cele două unde sunt în fază (maximele și minimele unei unde coincid cu maximele și minimele celelalte), se va produce o interferență constructivă iar unda rezultată va avea amplitudine mai mare (figura 6a). În cazul extrem în care undele sunt defazate cu 180° , însumarea celor două unde va conduce la obținerea unei unde a cărei amplitudine de vibrație este zero (figura 6b). În această situație spunem că avem interferență distructivă. În cazul în care cele două unde nu sunt în fază și nici nu sunt defazate cu 180° , prin însumarea lor se va obține o undă atenuată (figura 6c).

Așa cum am menționat anterior, undele sonore emise de un palpator/traductor provin din mai multe puncte de pe suprafața acestuia. În figura 7 este prezentat modul de interferență a undelor produse de 5 puncte de pe suprafața palpatorului/traductorului, la diferite intervale de timp ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$), care corespund unor distanțe diferite parcurse de unde în material. Se poate observa că, în apropierea feței traductorului, câmpul sonor este foarte neuniform. În controlul nedistructiv cu ultrasunete, această zonă se numește câmp apropiat sau zonă Fresnel.

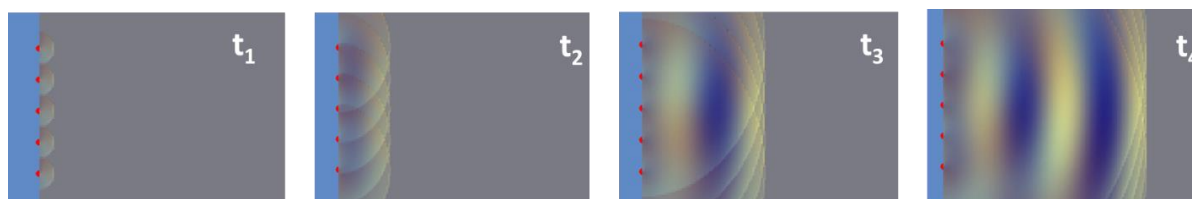


Figura 7. Modul de interferență a undelor produse de 5 puncte de pe suprafața unui traductor de ultrasunete la diferite intervale de timp ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$) după emiterea acestora.

Odată cu creșterea distanței față de traductor, câmpul sonor devine mai uniform. Acest lucru este rezultatul interferenței undelor emise de traductor și conduce la obținerea unui front de undă plat și paralel cu suprafața traductorului. Această zonă se numește câmp îndepărtat sau zona Fraunhofer. Trebuie remarcat că, chiar și în zona câmpului îndepărtat, nu avem un front

de undă perfect uniform. Totuși, la o anumită distanță de fața traductorului și central față de traductor, se dezvoltă un câmp de undă uniform și intens.

5.3.2 Viteza de propagare a undelor sonore

Viteza de propagare a undelor într-un material depinde de tipul de undă considerat, de densitatea și constantele de elasticitate ale materialului supus testării. Așadar, viteza de propagare a undelor sonice este diferită pentru fiecare material în parte. Relația (1) exprimă legătura dintre viteza de propagare a undelor, densitatea materialului și constantele sale de elasticitate [1]:

$$V = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}} \quad (1)$$

unde V este viteza de propagare a undelor (m/s), ρ este densitatea materialului (kg/m^3) și C_{ij} constanta de elasticitate în direcția considerată (N/m^2).

În funcție de constantele elastice luate în calcul (modulul lui Young (E), coeficientul lui Poisson (ν) și modul de elasticitate transversală (G)) și de tipul de undă folosit (longitudinală sau transversală), această relație poate lua diferite forme. În cazul materialelor izotrope, constantele de elasticitate sunt egale în toate direcțiile din material. Cu toate acestea, în industrie, marea majoritate a materialelor folosite sunt anizotrope și deci constantele de elasticitate sunt diferite. De exemplu, un semifabricat obținut prin laminare va avea grăunții cristalini alungiți pe direcția laminării. Constantele de elasticitate pe direcția laminării vor fi diferite de cele corespunzătoare unei direcții perpendiculare pe direcția de laminare.

În cazul testării unui material cu ajutorul unor unde longitudinale, viteza de propagare a acestora în material poate fi calculată cu relația de mai jos [1]:

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

unde V_L este viteza de propagare a undelor longitudinale (m/s), ρ este densitatea materialului (kg/m^3), E este modulul lui Young (N/m^2) și ν coeficientul lui Poisson.

În cazul testării unui material folosind unde transversale, viteza de propagare a acestora în material poate fi calculată cu relația de mai jos [1]:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

unde V_T este viteza de propagare a undelor transversale (m/s), G este modul de elasticitate transversală (N/m^2) ($G = E/2(1+\nu)$) și ρ este densitatea materialului (kg/m^3).

Tabelul 1. Viteza de propagare a undelor longitudinale și transversale, impedența acustică și densitatea pentru o serie de materiale [6].

Material	Viteza de propagare (m/s)		Impedanța acustică (10 ⁶ kg/m ² s)	Densitate (10 ³ kg/m ³)
	V _L	V _T		
Aluminiu	6400	3130	17,3	2,7
Cupru	4800	2330	42,5	8,9
Magneziu	4900	3080	9,9	1,7
Mercur	1450	-	19,6	13,6
Nichel	5480	2990	48,5	8,9
Otel	6100	3240	46,7	7,9
Fontă	3500-5600	2200-3200	25 - 40	7,2
Plumb	2160	700	25	11,4
Platină	3960	1670	85	21,4
Zinc	4170	2480	29,6	7,1
Alamă	3830	-	31	8,1
Cauciuc	2300	-	1,4	1,2
Cuarț	5570	3520	14,5	2,6
Plexiglas	2680	1320	3,2	1,2

Analizând ecuațiile 2 și 3 putem trage concluzia că, într-un material (oricare ar fi acesta), undele longitudinale se propagă cu o viteză care este de aproximativ 2 ori mai mare decât viteza de propagare a undelor transversale. În tabelul 1 sunt date vitezele de propagare a undelor longitudinale și transversale pentru o serie de materiale precum și impedența acustică și densitatea materialelor considerate.

5.3.3 Atenuarea ultrasunetelor

Atunci când o undă sonoră se propagă printr-un material, amplitudinea acesteia scade cu distanța față de sursă (traductor). Atenuarea unei unde sau modificarea amplitudinii acesteia poate fi exprimată matematic cu relația următoare:

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \quad (4)$$

unde A_0 este amplitudinea inițială a undei, A este amplitudinea undei atenuate după parcurgerea unei distante z și α este coeficientul de atenuare a undei pe direcția de propagare. Atenuarea undelor se datorează unui cumul de factori, dintre care îi amintim pe următorii [7]:

- Factori geometrici (lungimea de undă a undei ultrasonore, dimensiunea traductorului, prezența unor suprafețe reflectante în imediata apropiere a palpatorului etc.); Cu cât lungimea de undă a fascicolului de ultrasunete este mai mare cu atât fenomenul de atenuare va fi mai pronunțat.

- Absorbția energiei undei de către material. Acest fenomen constă în transformarea energiei sonore a undei în alte forme de energie (de exemplu termică);
- Mecanisme de împrăștiere a energiei undei de către material. Acest mecanism constă în reflectarea sunetului în alte direcții decât direcția inițială de propagare.
- Scăderea energiei în câmp îndepărtat (zona Fraunhofer) ca urmare a divergenței undei.

În figura 8 este prezentat un model de atenuare a intensității ecourilor receptate de traductor în cazul în care materialul analizat nu conține defecte.

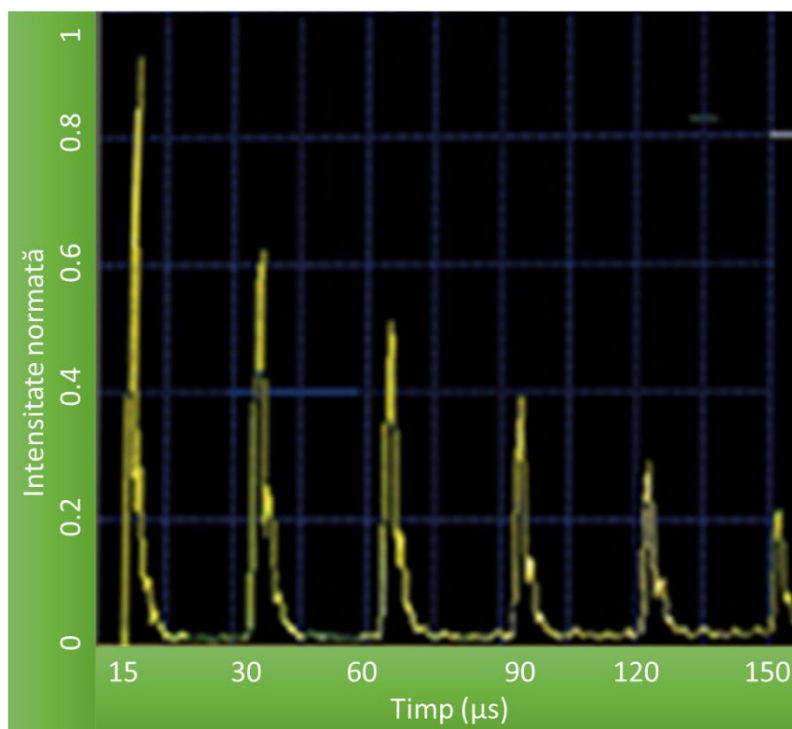


Figura 8. Atenuarea intensității ecourilor detectate de traductor într-un material lipsit de defecte.

În materiale solide, atenuarea ultrasunetelor crește odată cu creșterea frecvenței și se datorează, în principal, fenomenelor de împrăștiere a ultrasunetelor de către grăunții cristalini dar și de către eventualele defecte, imperfecțiuni structurale, dislocații, impurități, segregării etc. Așadar, atenuarea ultrasunetelor în materiale policristaline depinde de lungimea de undă aleasă și de dimensiunea grăunților cristalini ai materialului. Cu cât lungimea de undă este mai mare și granulația materialului mai grosolană cu atât fenomenul de dispersie este mai important (prezintă o creștere exponențială).

5.3.4 Impedanța acustică

O undă sonoră ce traversează un mediu are o presiune p , presiunea sonoră, care variază în timp și spațiu datorită fenomenului de atenuare anterior discutat. Impedanța acustică a unui material este definită ca fiind produsul dintre densitatea materialului și viteza de propagare a undelor în materialul respectiv (relația 5) [8].

$$Z_c = \rho \cdot v \quad (5)$$

unde Z_c este impedanța acustică, ρ este densitatea materialului și v este viteza de propagare a undelor în material. Deoarece impedanța acustică depinde doar de caracteristicile materialului considerat, aceasta se mai numește și impedanță caracteristică. În tabelul 1 sunt prezentate valorile impedanțelor acustice pentru o serie de materiale luând în calcul viteza de propagare a undelor longitudinale în aceste materiale.

5.4 Reflexia și transmisia undelor sonore

5.4.1 Incidența normală

Atunci când o undă sonoră ajunge la interfața dintre două medii a căror impedanță acustică este diferită, ea poate fi reflectată, transmisă sau refractată parțial sau total. Atunci când o undă are o incidență normală cu interfața dintre două medii (unda este perpendiculară pe interfață), o parte din energia undei va fi reflectată înapoi în mediul original, iar cealaltă parte va trece în celălalt mediu (va fi transmisă), păstrându-și direcția conform figurii 9.

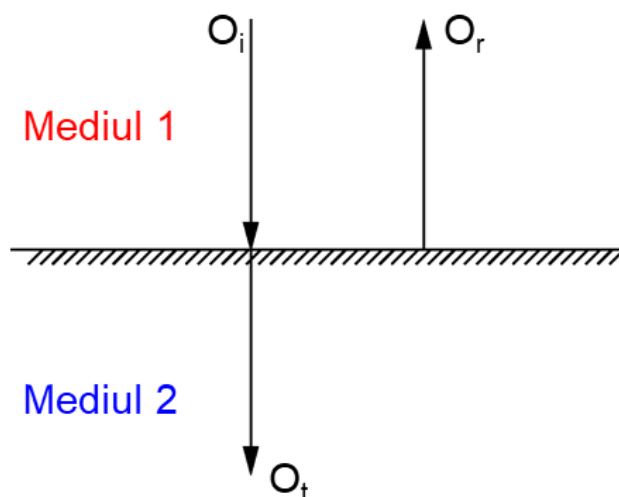


Figura 9. Reflexia și transmisia undelor sub incidență normală (O_i este unda incidentă, O_r este unda reflectată și O_t este unda transmisă)

Cât anume din energia undei incidente va fi reflectată și cât va fi transmisă la interfața între două medii diferite depinde de impedanța acustică a celor două medii. În conformitate cu teoria propagării undelor sonore, și luând în considerare valorile impedanței acustice ale mediilor 1 și 2, se obțin coeficienții de reflexie și transmisie [1]:

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (6)$$

unde R este coeficientul de reflexie, Z_1 și Z_2 sunt impedanțele acustice ale celor două medii ce formează interfața. Înmulțind valoarea lui R cu 100 se obține cantitatea de energie reflectată de interfață. Trebuie menționat că, coeficientul de transmisie se calculează cu relația:

$$T = 1 - R \quad (7)$$

Pentru a exemplifica cele menționate mai sus, în cele ce urmează vom calcula procentul de energie reflectată în cazul unei unde sonore reflectată la interfața dintre oțel și apă, respectiv oțel și aer. Impedanța acustică a oțelului este 46,7, a apei este 1,48 și a aerului este 0,0004.

Interfața oțel-apă:

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \left(\frac{1.48 - 46.7}{46.7 + 1.48} \right)^2 = 0.8809$$

La interfața oțel-apă, 88,09% din energia unei incidente este reflectată și în consecință, doar 11.91% va fi transmisă.

Interfața oțel-aer:

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \left(\frac{46.7 - 0.0004}{46.7 + 0.0004} \right)^2 = 0.99998^2 = 0.99996$$

La interfața oțel-aer, 99.996% din energia unei incidente este reflectată, putând spune că energia unei este reflectată aproape în întregime de această interfață.

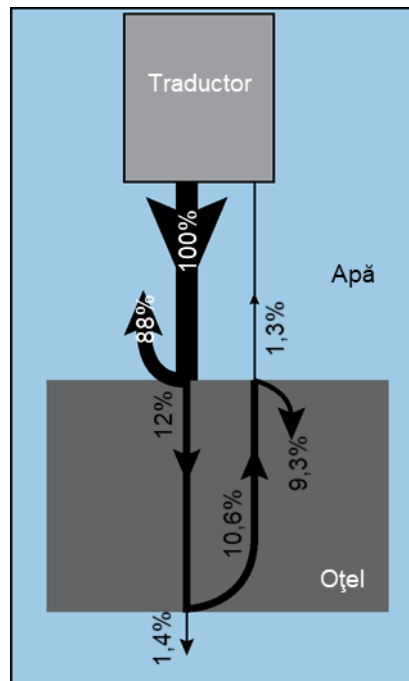


Figura 10. Exemplu de calcul al energiei transmise respectiv reflectate [4].

În continuare vom analiza energia recepționată de un traductor în cazul realizării unui control nedistructiv cu ultrasunete sub apă, conform figurii 10. Vom presupune, pentru a ușura calculul, că toate undele emise de traductor ajung la interfața apa-oțel. La interfața dintre apă și oțel, 12% din energie se transmite și 88% se reflectă. Pe interfața inferioară (oțel-apă), din procentul de 12% incident, 88% este reflectat. Acest lucru înseamnă că 10,56% se reflectă înapoi și atinge interfața superioară. Aici, din nou, 88% se reflectă și 12% se transmite traductorului. În urma calculelor, rezultă că traductorul recepționează doar 1,26% din energia totală produsă inițial. Trebuie menționat că, pentru a ușura calculele, fenomenul de atenuare a undelor la trecerea lor prin material (apa sau oțel) nu a fost luat în calcul.

Pentru calcule mult mai riguroase trebuie ținut cont de fenomenul de atenuare a undelor la trecerea lor prin material, în această situație traductorul va recepționa o energie și mai mică de energie decât energia calculată fără a lua în calcul fenomenul de atenuare.

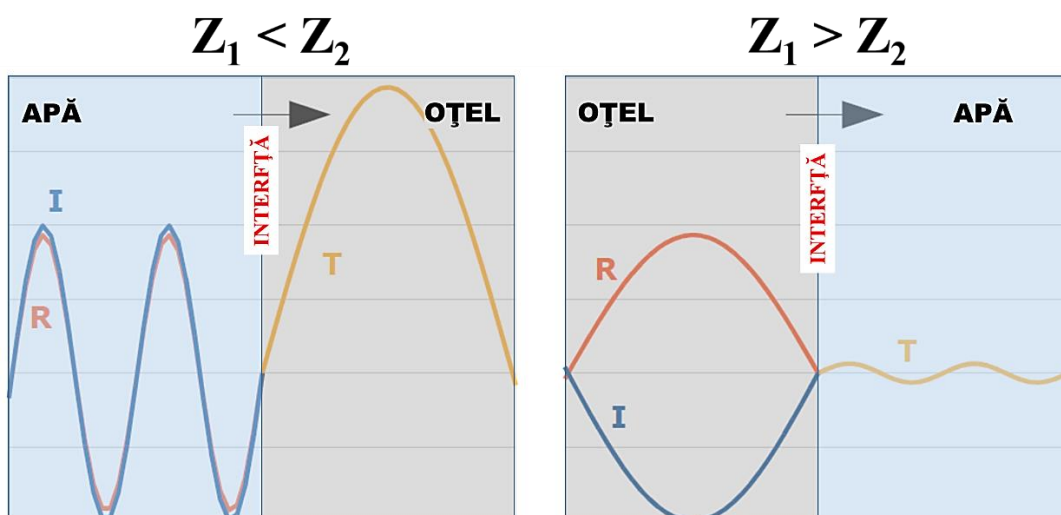


Figura 11. Unda incidentă (I), unda reflectată (R) și unda transmisă (T) la interfața apă – oțel respectiv oțel – apă [8].

În funcție de valorile impedanțelor materialelor care alcătuiesc interfața se deosebesc următoarele situații [9]:

- $Z_1 < Z_2$ reflexia undei are loc fără schimbarea fazei, adică unda reflectată va oscila în fază cu unda incidentă (figura 11);
- $Z_1 > Z_2$ reflexia undei are loc cu schimbarea fazei, adică apare o diferență de fază între unda incidentă și unda reflectată, acest defazaj fiind egal cu π . Acestui defazaj îi corespunde o jumătate de lungime de undă ($\lambda/2$) (figura 11).
- $Z_1 = Z_2$, fenomenul de reflexie este inexistent, întreg sunetul trecând din mediul 1 în mediul 2;

Randamentul propagării unei unde este cu atât mai bun cu cât impedanța acustică a mediului din care provine unda (Z_1) este mai mică decât impedanța acustică a mediului în care se va propaga unda (Z_2). Fenomenul de reflexie cvasitotală a ultrasunetelor de către orice discontinuitate de natură gazoasă (fisură, suflură, etc), inclusă în material, stă la baza principiului detectării defectelor cu ajutorul ultrasunetelor.

5.4.2 Incidența oblică

Dacă o undă longitudinală întâlnește oblic o interfață între două medii diferite, o parte din energia undei va fi reflectată în mediul din care provine (mediul 1) și o altă parte se refractă trecând în mediul 2 sub un alt unghi. În ambele medii, atât energia reflectată cât și energia refractată, se descompun în două componente, având loc fenomenul de transformare a undelor într-o undă longitudinală (V_{L1} și V_{L2}) și o undă transversală (V_{T1} și V_{T2}), așa cum se poate observa în figura 12. Acest fenomen de transformare a unei unde longitudinale în unde transversale reflectate și refractate (transmise) este cunoscut sub denumirea de conversie de mod.

Relația dintre viteza undei incidente, vitezele undelor reflectate sau refractate și unghiurile corespunzătoare de incidență, reflexie sau refracție este data de legea lui Snell [1]:

$$\frac{\sin \theta_1}{V_{L1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{L2}} = \frac{\sin \theta_3}{V_{T1}} = \frac{\sin \theta_4}{V_{T2}} \quad (8)$$

unde V_{L1} și V_{L2} reprezintă vitezele de propagare a undelor longitudinale în mediul 1, respectiv 2, V_{T1} și V_{T2} reprezintă vitezele de propagare a undelor transversale în mediul 1, respectiv 2, θ_1 și θ_2 reprezintă unghiul de incidență și de refracție a undelor longitudinale și θ_3 și θ_4 reprezintă unghiul de incidență și de refracție a undelor transversale.

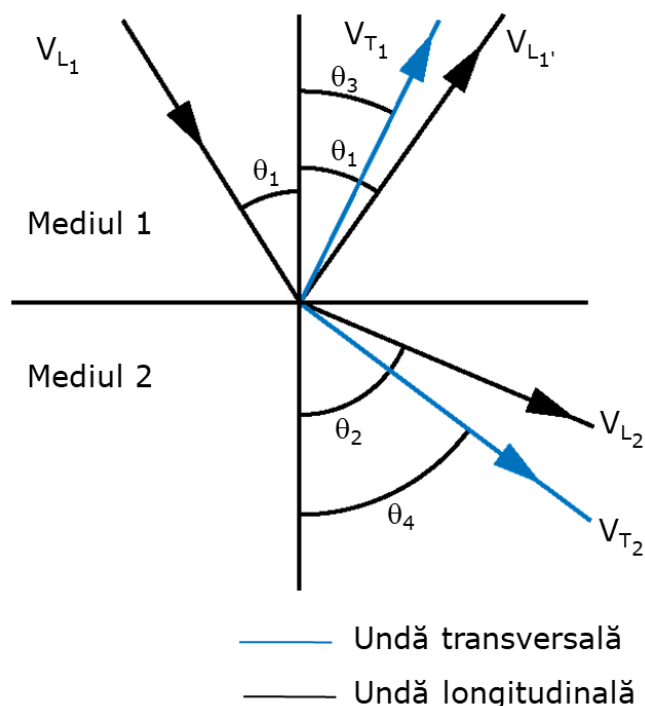


Figura 12. Reflexia și refracția undelor sub incidență oblică pentru undele incidente longitudinale.

Așa cum am văzut anterior (tabelul 1) viteza de propagare a undelor longitudinale este mai mare ca viteza de propagare a undelor transversale ($V_L > V_T$). De aici rezultă că unghiul

de refracție al undei transversale este întotdeauna mai mic decât unghiul de refracție al undei longitudinale ($\theta_4 < \theta_2$).

Tabelul 2. Primul și al doilea unghi critic pentru incidență oblică a undelor longitudinale.

Material	Primul unghi critic	Al doilea unghi critic
Apă/Oțel	14,6 °	27,5 °
Apă/Aluminiu	13,7 °	28,9 °
Plexiglas/Oțel	27,2 °	56,7 °
Plexiglas/Aluminiu	25,4 °	61,2 °

Daca unghiul (θ_1) de incidență al undei crește, se poate ajunge la următoarele situații [10]:

- daca $\theta_2 = 90^\circ$, în mediul 2 nu mai există unde longitudinale, deci vom avea reflexie totală a undelor longitudinale. Valoarea unghiului θ_1 pentru care are loc reflexia totală a undelor longitudinale se numește *primul unghi critic*.
- daca $\theta_4 = 90^\circ$, în mediul 2 nu mai există unde transversale, deci vom avea reflexie totală a undelor transversale. Dincolo de acest unghi (la unghiuri mai mari), avem reflexie totală a undei incidente. Valoarea unghiului θ_1 pentru care are loc acest fenomen se numește *al doilea unghi critic*. În tabelul 2 sunt date valorile pentru primul și al doilea unghi critic pentru interfețele apă/oțel, apă/aluminiu, plexiglas/oțel și plexiglas/aluminiu.

5.5 Generarea ultrasunetelor

Marea majoritate a traductorilor utilizați în defectoscopia cu ultrasunete folosesc cristalele piezoelectrice pentru generarea și detecția ultrasunetelor. Efectul piezoelectric constă în apariția unor sarcini electrice egale și de semn opus pe fețele unui cristal, atunci când acesta este supus unor eforturi de tracțiune sau compresiune. Sarcinile electrice de pe o față a cristalului piezoelectric vor fi pozitive sau negative, în funcție de tipul efortului la care este supus cristalul (tracțiune sau compresiune), iar valoarea sarcinilor electrice depinde de mărimea efortului aplicat cristalului. Acest fenomen este reversibil, la aplicarea unei diferențe de potențial pe suprafețele cristalului piezoelectric, acesta se va comprima sau dilata în funcție de polarizarea fetelor și de valoarea diferenței de potențial aplicate. Aplicarea unei tensiuni electrice alternative asupra cristalului va face ca acesta să oscileze în concordanță cu frecvența aplicată, transmițând astfel mediului oscilații mecanice [11].

Deformațiile unui cristal piezoelectric se produc de-a lungul axelor sale polare. În funcție de direcția după care sunt tăiate aceste plăcuțe, ele vor produce unde longitudinale sau unde transversale. Pentru ca efectul piezoelectric de generare a ultrasunetelor să se facă cu un randament cât mai mare, este necesar ca frecvența tensiunii aplicate plăcuței piezoelectrice să fie cât mai apropiată de frecvența ei de rezonanță. Frecvența de rezonanță a unei plăcuțe piezoelectrice este în funcție de grosimea ei. Cu cât plăcuța este mai subțire cu atât frecvența de rezonanță este mai mare. O plăcuță piezoelectrică va produce ultrasunete a căror lungime de undă este egală cu dublul grosimii plăcuței. Așadar, dacă se dorește o anumită lungime de

undă, plăcuța piezoelectrică se va tăia în așa fel încât grosimea ei să fie egală cu jumătate din lungimea de undă dorită [1].

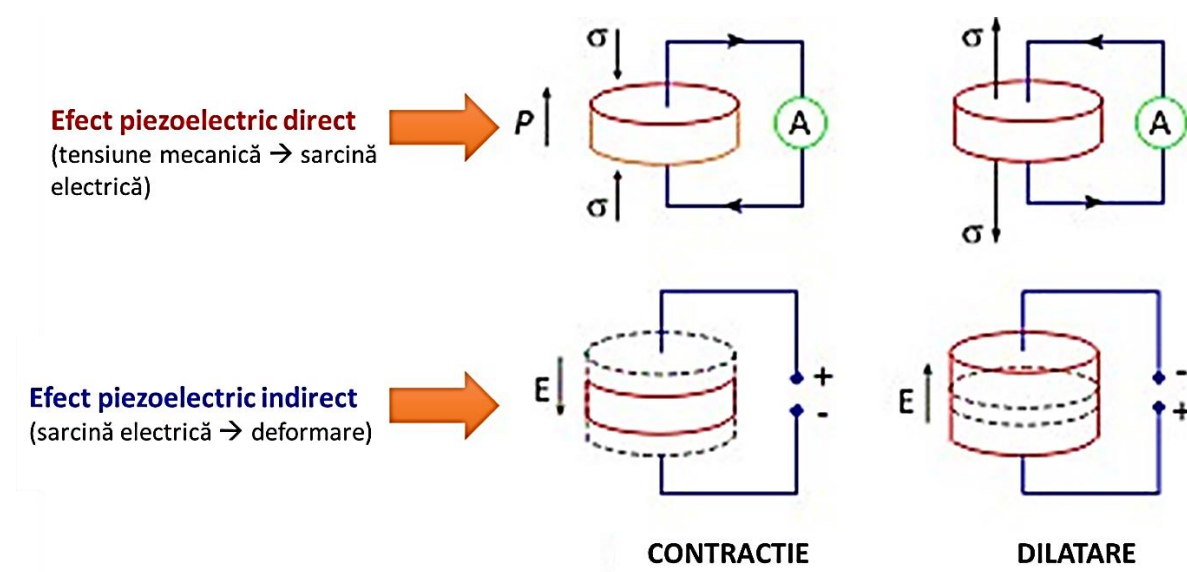


Figura 13. Efectul piezoelectric direct și indirect [adaptată după 12].

Cele mai cunoscute materiale piezoelectrice naturale sunt: cuarțul (SiO_2), turmalina ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) și sarea Seignette ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6$). Dintre acestea, cuarțul este cel mai folosit, fiind și primul material folosit la realizarea traductorilor pentru controlul nedistructiv cu ultrasunete. Acesta are avantajul de a fi stabil din punct de vedere electronic și termic, este insolubil în aproape orice lichid, are rezistență mecanică mare și susceptibilitate scăzută la îmbătrânire. Principalul dezavantaj al cuarțului este eficiența redusă a conversiei electromecanice.

Sulfatul de litiu - Este un alt material monocristalin care se folosește pe scară largă ca traductor de ultrasunete, dovedindu-se a fi un excelent receptor de ultrasunete. Are o eficiență de conversie electromecanică acceptabilă, și are o bună rezistență la îmbătrânire. Principalele sale dezavantaje sunt fragilitatea sa ridicată, rezistența redusă la temperatură (poate fi utilizat până la temperatura de $74\text{ }^\circ\text{C}$) și faptul că este un material solubil în apă [11].

Pe lângă cristalele naturale, dezvoltarea științei și ingineriei materialelor a permis obținerea unor materiale sintetice cu proprietăți piezoelectrice superioare, cunoscute sub denumirea generală de materiale ceramice polarizate. Acestea au fost dezvoltate la începutul anilor '50 din secolul XX. Prima piesă piezoceramică de întrebuințare generală a fost titanitul de bariu. Înainte de introducerea ceramicii piezoelectrice, traductoarele erau făcute din cristale piezoelectrice de cuarț sau din elemente magnetostrictive. Din cauza costurilor de fabricație ridicate și a proprietăților piezoelectrice limitate ale acestor materiale, se folosesc cu o frecvență redusă la traductoarele din zilele noastre. Cele mai cunoscute astfel de materiale sunt:

- titanatul de bariu (BaTiO_3);
- titanatul de plumb (PbTiO_3);
- zircotitanatul de plumb - PZT (PbZrTi);
- metaniobatul de plumb (PbNb_2O_6);
- niobatul de litiu (NbLiO_3) etc [11].

Ultrasunete pot fi produse și prin intermediul efectului magnetostrictiv, care constă în modificarea dimensiunilor unor materiale feromagnetice ca urmare a aplicării unui câmp magnetic extern. Cu toate că se pot obține ultrasunete și prin magnetostricțiune, sunt extrem de rare cazurile în care se folosesc traductoare bazate pe acest fenomen.

5.6 Traductori de ultrasunete

Traductorii de ultrasunete au rolul de a transforma un curent electric în vibrații mecanice (mod transmitere) și de a transforma vibrațiile mecanice în semnal electric (mod recepție).

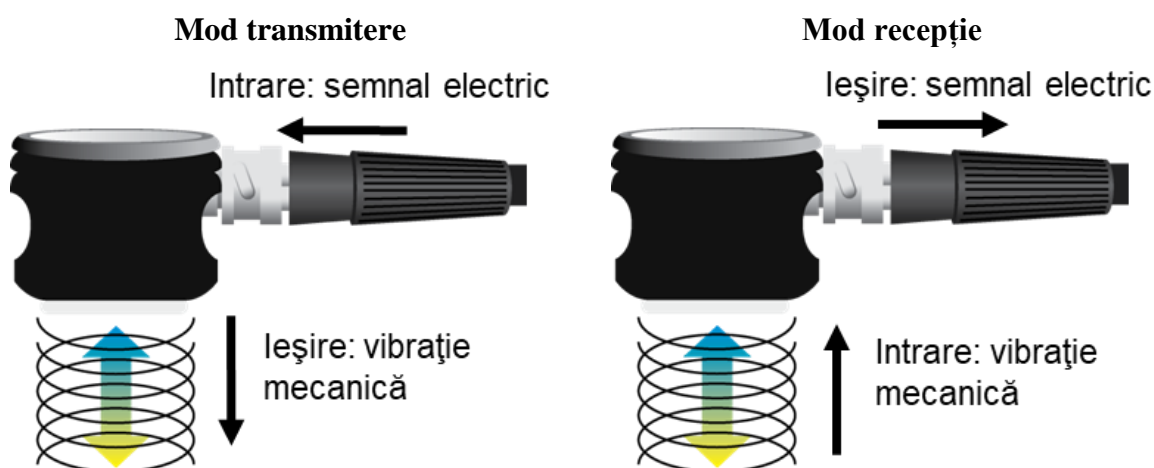


Figura 14. Funcționarea traductorilor de ultrasunete în mod transmitere și mod recepție [4].

Atunci când un traductor funcționează în modul transmitere, un semnal electric alternativ induce vibrații de frecvență înaltă în traductor, vibrații care sunt transmise ca unde ultrasonore materialului testat. Funcționarea traductorului în modul recepție presupune recepționarea vibrațiilor primite dinspre materialul analizat (ultrasunete reflectate de defecte sau de pereții probei) și transformarea acestor vibrații în semnal electric, ce poate fi mai apoi afișat și analizat.

Structura de bază în secțiune a unui traductor utilizat în defectoscopia cu ultrasunete este prezentată în figura 15. Am menționat anterior că grosimea materialului piezoelectric trebuie să fie egală cu jumătate din lungimea de undă ce dorim să o emită traductorul. Pentru a obține cât mai multă energie sonoră de la un traductor, între elementul activ (cristalul piezoelectric) și fața traductorului se introduce un material de trecere. Acesta trebuie să aibă o impedanță acustică care să se situeze între impedanța acustică a cristalului piezoelectric și impedanța acustică a materialului investigat. Pentru a obține rezultate optime, grosimea acestuia trebuie să fie egală cu $\frac{1}{4}$ din lungimea de undă emisă de cristalul piezoelectric. În acest fel, undele reflectate de stratul de trecere sunt în fază cu undele care trec de acest strat neconducând la fenomene de atenuare prin interferență distructivă. Traductorii pentru ultrasunete mai conțin și un strat de uzură, acesta protejând stratul de trecere și cristalul piezoelectric de zgârieturi ce pot să apară în timpul utilizării. Blocul de amortizare (amortizor) susține cristalul piezoelectric și are o influență deosebită asupra caracteristicilor de amortizare a traductorului. Folosirea unui bloc de amortizare, a cărui impedanță acustică este similară cu impedanța acustică a cristalului

piezoelectric, va conduce la cea mai bună amortizare a ultrasunetelor. În acest caz, traductorul va avea o bandă de frecvență mai largă, ceea ce va conduce la o sensibilitate crescută a măsurătorii. În caz contrar (diferență mare între impedanța acustică a cristalului piezoelectric și a blocului de amortizare), adâncimea de penetrare a ultrasunetelor va crește dar sensibilitatea traductorului va scădea semnificativ. Sensibilitatea unui traductor se definește ca fiind capacitatea acestuia de a detecta (de a pune în evidență) defecte de dimensiuni cât mai mici. Rezoluția palpatorului este definită ca fiind capacitatea acestuia de a separa undele reflectate de două defecte, aflate la o diferență de adâncime cât mai mică.

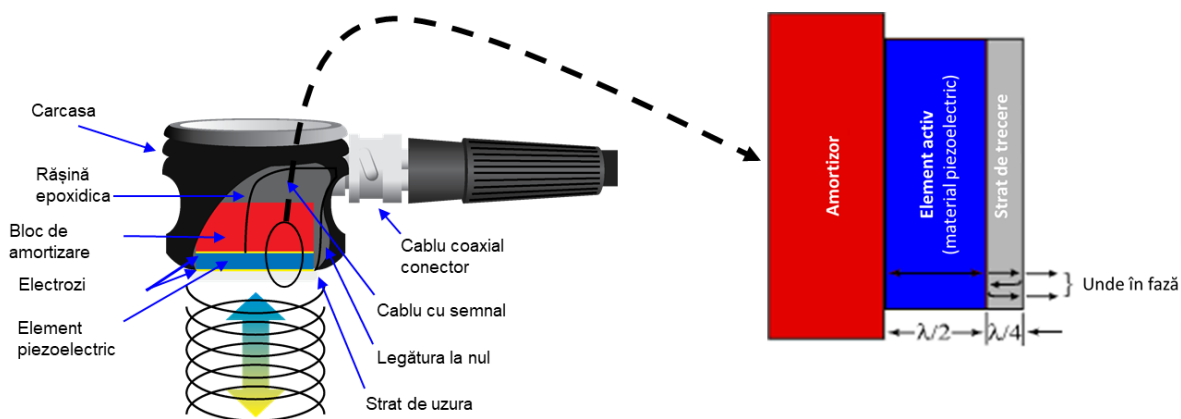


Figura 15. Reprezentarea schematică în secțiune a unui traductor [4].

Așa cum am menționat anterior, întreaga suprafață a unui traductor se constituie în surse de ultrasunete, ceea ce conduce la ideea că suprafața unui traductor este alcătuită din-un număr infinit de surse de ultrasunete. Undele emise de aceste surse vor suferi fenomene de interferență distructivă sau constructivă în drumul lor prin materialul investigat. Această interferență a undelor va conduce la un câmp sonor, caracterizat de fluctuații importante a intensității sunetului, în apropierea feței traductorului. Această zonă este cunoscută sub denumirea de câmp apropiat. Datorită fluctuațiilor intensității sunetului în această zonă, orice defect situat în câmpul apropiat va fi foarte greu de evaluat corect. La o distanță față de traductor, undele se combină dând naștere la un front de undă mult mai uniform cunoscut sub denumirea de câmp îndepărtat. Tranziția dintre câmp apropiat și câmp îndepărtat are loc după o distanță notată cu N , distanță ce poate fi calculată pentru un traductor cilindric cu relația 9. Detecția optimă a defectelor se realizează în câmp îndepărtat datorită uniformității și intensității crescute a frontului de undă [13].

$$N = \frac{D^2 f}{4V} \quad (9)$$

unde D este diametrul traductorului, f este frecvența ultrasunetelor emise de traductor, V este viteza longitudinală a undelor în materialul analizat.

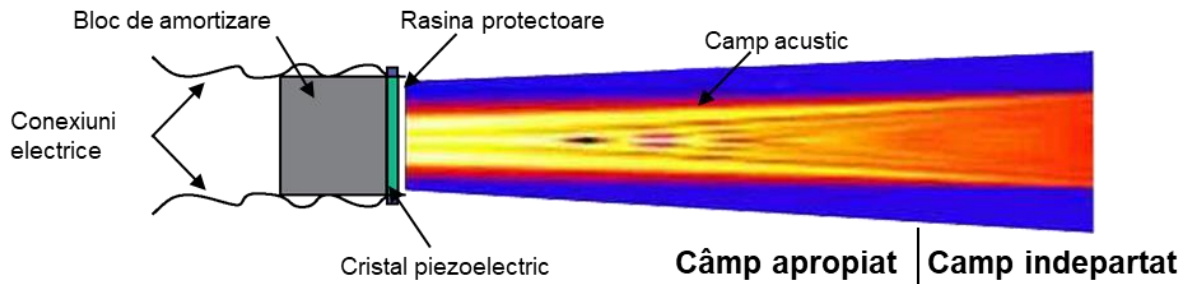


Figura 16. Distribuția intensității sunetului în câmpul apropiat și câmpul îndepărtat al unui traductor. Culorile deschise reprezintă intensitate ridicată a sunetului iar culorile închise reprezintă intensitate scăzută a acestuia [4].

Un alt fenomen care conduce la diminuarea intensității sunetului este divergența. Ultrasunetele emise de un palpator, cilindric de exemplu, nu se vor propaga în material sub forma unui front de undă cilindric, ci mai degrabă sub forma unui con, datorita fenomenului de divergență.

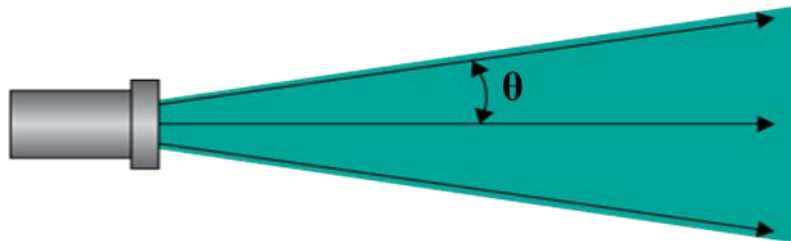


Figura 17. Definierea divergenței unui fascicul de ultrasunete emise de un traductor.

Divergența unui fascicul de ultrasunete se exprimă prin unghiul dintre axul central al traductorului (axul acustic) și suprafața exterioară a conului format de fasciculul de ultrasunete. În practică, acest unghi se aproximează ca fiind unghiul dintre axul central al palpatorului și zona în care intensitatea acustică a scăzut la jumătate din intensitatea caracteristică axului traductorului. Unghiul de divergență este puternic influențat de frecvența ultrasunetelor și de diametrul traductorului, putând fi aproximat cu următoarea relație [1]:

$$\sin \theta = 1.2 \frac{V}{Df} \quad (10)$$

unde θ reprezintă divergența fasciculului (unghiul dintre axul traductorului și zona în care intensitatea sonoră a scăzut la jumătate), V este viteza sunetului în materialul investigat, D este diametrul traductorului și f este frecvența ultrasunetelor emise de traductor.

Pentru un fascicul de ultrasunete ce se propaga într-un material, în zona de câmp îndepărtat, intensitatea sonoră maximă este atinsă de-a lungul axului central al traductorului și va scădea pe măsura ce ne îndepărtăm de acesta. Așadar, intensitatea sonoră a unui fascicul de ultrasunete scade atât de-a lungul axului traductorului cât și pe direcție radială. Acest lucru va face ca sensibilitatea detecției unui defect să fie diferită, în funcție de partea din fascicul care este reflectată de către defect, așa cum este prezentat în figura 18.

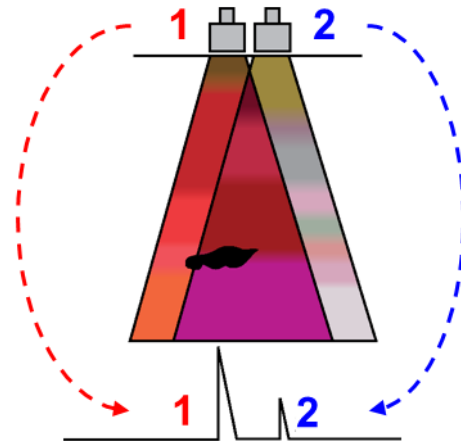


Figura 18. Intensitatea ecoului dat de un defect atunci când detecția defectului se face cu fascicolul central (1) sau cu marginea fascicolului (2).

5.6.1. Tipuri de traductori/palpatoare

În funcție de modul de funcționare și de geometria traductorului se deosebesc următoarele tipuri principale de palpatoare:

5.6.1.1. Traductori de contact.

Acest tip de traductori sunt denumiți și traductori normali, deoarece fascicolul de ultrasunete are o incidență normală (90°) cu suprafața piesei examinate. Se folosesc în contact direct cu suprafața inspectată și sunt manipulate de un tehnician. Acestea au elementele active protejate de o carcasă robustă, pentru a putea suporta contactul direct cu o mare varietate de materiale. Au un design ergonomic pentru a fi mai ușor de manipulat și de mișcat de-a lungul suprafeței. Placa de uzură a acestui tip de traductor poate fi înlocuită pentru a le prelungi durata de viață. Între suprafața traductorului și suprafața piesei investigate se folosește un material de cuplare, de obicei lichid, precum apă, uleiuri, vaselină sau diverse materiale special concepute pentru a realiza cuplajul cât mai eficient între traductor și materialul investigat.

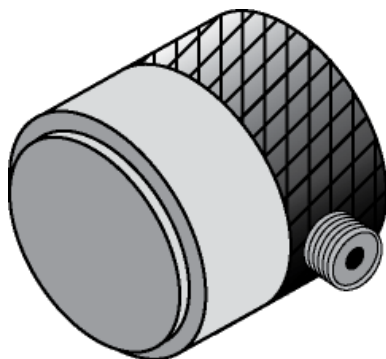


Figura19. Traductor de contact [14].

Acest tip de traductor este foarte util atunci când suprafața examinată este plană și rezoluția determinării, în apropierea suprafeței scanate, nu este extrem de importantă. În multe situații, suprafețele examinate nu sunt plane. De exemplu, dacă dorim să examinăm o suprafață curbă, vom avea nevoie de o piesă de legătură între traductor și suprafața curbă, piesă care să replice curbura suprafeței examinate. Dacă ne interesează ca rezoluția determinării în straturile superficiale ale probei să fie cât mai bună, sau dacă avem nevoie de o incidență oblică a ultrasunetelor, atunci unul din detectorii descriși mai jos pot fi folosiți.

5.6.1.2 Traductor cu cristal dublu

Atunci când inspectăm sau măsurăm materiale subțiri sau când detectăm discontinuități de suprafață, o “zonă moartă” apărută pe ecranul echipamentului poate împiedica obținerea unui rezultat clar. Această zonă moartă este cauzată de faptul că, cristalul piezoelectric primește un răspuns (recepționează ultrasunete reflectate), la scurt timp după transmisie, fără o amortizare suficientă a vibrațiilor. Pentru a evita acest inconvenient au fost create traductoarele cu cristal dublu, care sunt capabile să separe faza de emisie (transmisie) a ultrasunetelor de faza de recepție a acestora. Cele două cristale piezoelectrice sunt separate de un material izolator fonic și sunt ușor înclinate în raport cu fața traductorului. Fiecare cristal funcționează fie ca transmițător, fie ca receptor, fără să conteze neapărat care din ele îndeplinește o anumită funcție. Datorită faptului că unele materiale piezoelectrice au caracteristici foarte bune de emițător de ultrasunete, și nu neapărat foarte bune caracteristici de receptor, sau invers, cele două cristale pot fi diferite. Pentru emisia de ultrasunete se va alege un cristal cu bune caracteristici de emițător iar pentru recepția acestora se poate alege un alt tip de cristal care excelează ca receptor.

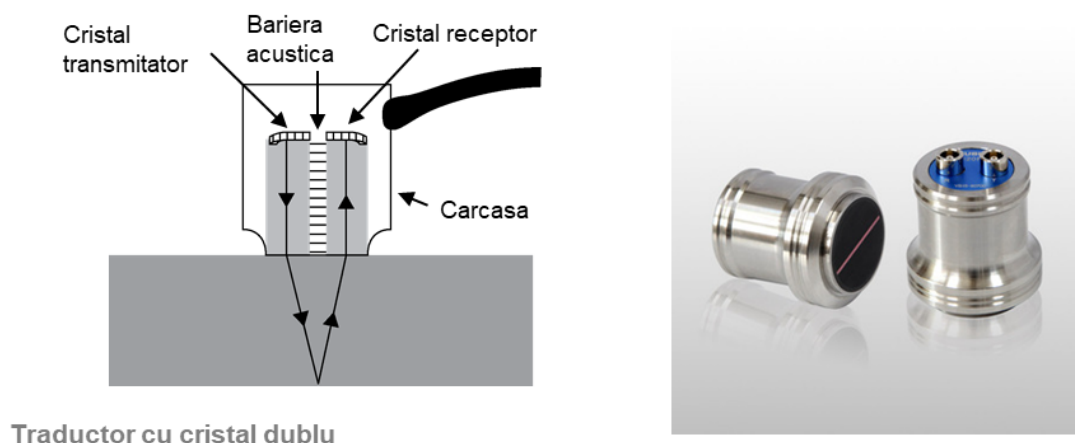


Figura 20. Reprezentarea schematică și imaginea unui traductor cu cristal dublu [13].

Datorită înclinării cristalelor piezoelectrice, traductorii cu element dual nu pot fi folosiți pentru examinarea materialelor groase. În schimb, acest tip de traductor este ideal pentru măsurarea grosimii materialelor subțiri sau pentru detectarea defectelor aflate în imediata vecinătate a suprafeței (la adâncimi mai mici de 3 mm). Tot datorită înclinării cristalelor, are loc o focalizare naturală a fascicolului de ultrasunete pe o anumită zonă a materialului, zonă în care sensibilitatea detecției este maximă.

5.6.1.3 Traductori cu linie de întârziere

După cum indică numele lor, aceștia sunt prevăzuți cu o linie de întârziere al cărei scop principal este să introducă un timp de întârziere între etapa de generare a ultrasunetelor și etapa de recepție a acestora. Acest lucru permite traductorului să poată completa trimiterea fascicolului de ultrasunete înainte de a începe funcția de "ascultare" sau recepție. Datorită posibilității schimbării liniei de întârziere, a stratului de protecție împotriva uzurii, a membranei care asigură contactul cu proba examinată etc, aceste traductoare sunt potrivite pentru o gamă foarte largă de aplicații. Acest tip de traductoare este recomandat pentru aplicații care necesită o bună rezoluție a determinării în straturile superficiale ale materialului (aproape de suprafață). Sunt proiectate pentru utilizarea lor în aplicații precum măsurarea grosimii cu precizie mare la materialele subțiri și controale de delaminare la materialele compozite.

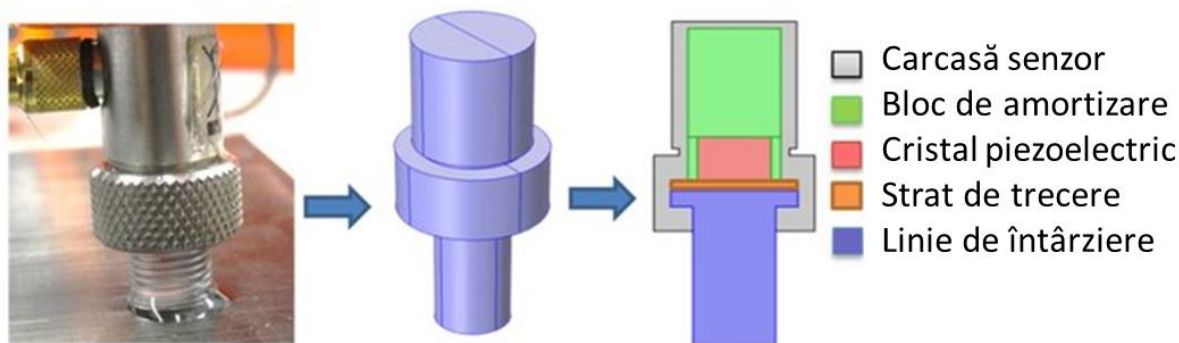


Figura 21. Traductor cu linie de întârziere [15].

De asemenea, pot fi folosite pentru examinări la temperaturi ridicate, deoarece linia de întârziere izolează termic cristalul piezoelectric față de suprafața aflată la temperaturi ridicate.

5.6.1.4 Traductori unghiulari

Traductorii unghiulari sunt diferiți de cei normali sau direcți, deoarece cristalul formează un anumit unghi cu suprafața materialului. Unghiul este obținut atașând o pană polimerică între cristalul piezoelectric și suprafață. Poate o fi o pană de unghi fix, închisă înăuntrul carcasei, sau poate fi o pană al cărei unghi poate fi modificat cu ajutorul unui șurub. Traductorii unghiulari folosesc principiul refracției și a conversiei de mod a unui fascicul de ultrasunete, pentru a produce unde transversale sau longitudinale, refractate sub un anumit unghi în materialul investigat.



Figura 22. Traductori unghiulari [13].

Unghiul nominal cu care fascicolul de ultrasunete penetrează materialul (de obicei 35°, 45°, 60°, 70° și 80°) este valid pentru anumite materiale, în general, pe traductori este trecut unghiul de penetrare pentru oțel. În cazul în care avem de-a face cu un alt material, unghiul real de penetrare (de refracție) trebuie calculat folosind legea lui Snell. Schimbarea unghiului de penetrare se datorează vitezei de propagare a undelor transversale, care este diferită de la material la material. Foarte adesea, acest tip de traductor este folosit pentru inspecția sudurilor, pentru a pune în evidență defecte care nu sunt paralele cu suprafața materialului examinat. Cu ajutorul acestui tip de palpator pot fi generate și unde de suprafață, pentru a se detecta defectele de suprafață ale unei piese/semifabricat.

5.6.1.5 Traductori de imersie

Acest tip de traductoare nu intră în contact direct cu piesa examinată. Traductorii de imersie sunt concepuți să poată fi folosiți atunci când piesa este imersată într-un lichid. În această situație, toate conexiunile sale electrice sunt izolate împotriva infiltrării apei. Aceștia se folosesc, de obicei, în interiorul unui rezervor cu apă. Când se utilizează traductoare de imersie, cel mai adesea, manipularea lor se realizează cu manipuloare automatizate. Pentru eficiență sporită, stratul de trecere are o impedanță acustică cuprinsă între impedanța acustică a apei și impedanța acustică a cristalului piezoelectric. Suprafața de emisie a acestui tip de traductor poate să fie plană (traductor de imersie normal) sau poate să fie de tip lentilă acustică (traductoare focalizate). În funcție de suprafața de emisie a lentilei acustice, traductoarele pot focaliza fascicolul de ultrasunete într-un punct sau pe o linie, așa cum se poate observa în figura 23. Traductoarele focalizate sunt caracterizate de sensibilitate și rezoluție axială crescută, datorită concentrării fascicolului sonor pe o zonă (suprafață) mică, dar suprafața scanată este mică.

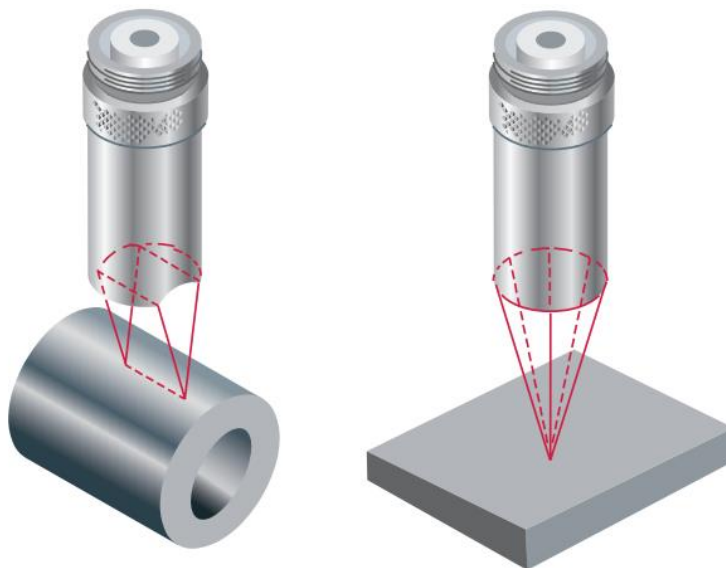


Figura 23. Traductoare de imersie cu fascicul ultrasonor focalizat pe o linie sau într-un punct [14].

5.6.1.6 Traductori phased array

Așa cum am văzut anterior, traductorii convenționali constau în mod obișnuit fie dintr-un singur element activ (cristalul piezoelectric), care generează și primește ultrasunete, fie două

elemente active pereche, una pentru transmisie și una pentru recepție. Traductorii de tip phased array, pe de altă parte, constau în mod obișnuit dintr-un ansamblu de 16 până la 256 de elemente active individuale de mici dimensiuni, care pot fi pulsate (vibrate/excite) fiecare separat. Orientarea fascicolului de ultrasunete în materialul examinat se realizează prin pulsarea elementelor individuale ale traductorului la momente ușor diferite. Fronturile de unda emise de fiecare cristal piezoelectric se combină între ele dând naștere, în mod previzibil, la interferențe constructive sau distructive, cu ajutorul cărora se modelează și orientează fascicolul de ultrasunete ce se propagă în material. Cristalele piezoelectrice ce formează acest tip de traductor pot fi aranjate într-o largă varietate de forme precum: bandă (matrice liniară), inel (matrice inelară), circular (matrice circulară) sau pătrat (matrice pătrată).

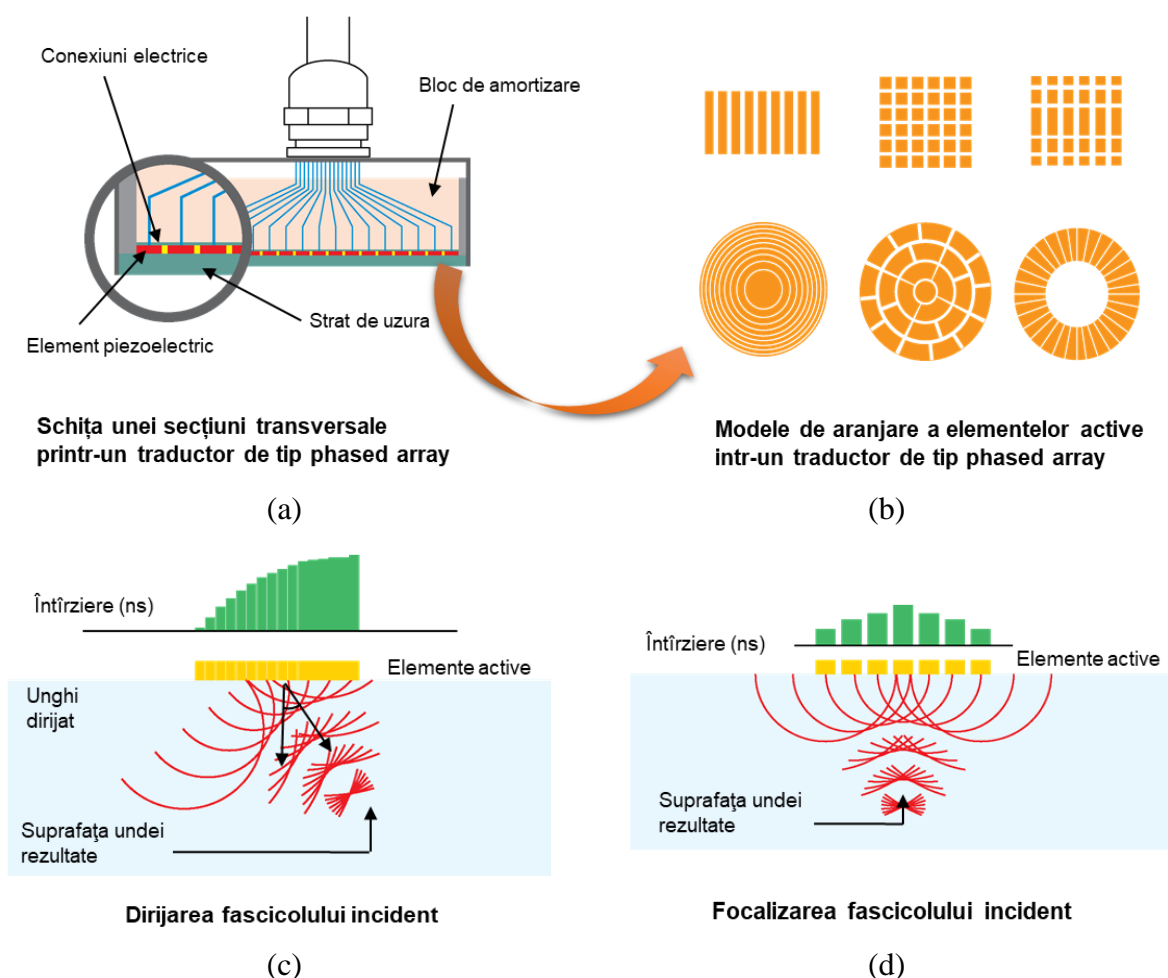


Figura 24. Schița unui traductor de tip phased array (a) și a modului de aranjare a cristalelor piezoelectrice (b). Dirijarea (c) și focalizarea (d) fascicolului de ultrasunete cu ajutorul excitării elementelor active, la momente diferite și într-o anumită succesiune [13,14].

Similar cu traductoarele convenționale, traductorii phased array pot fi proiectați pentru utilizarea ca traductori de contact sau în imersie în apă. Frecvențele la care funcționează aceste traductoare sunt cel mai frecvent cuprinse în intervalul 2 MHz - 10 MHz. Acest tip de traductori poate fi folosit doar împreună cu echipamente adecvate, care permit excitarea separată a elementelor active (la diferite intervale de timp), permit recepția și digitalizarea ecourilor care

se întorc, permit compilarea acestor informații și afișarea lor în diferite formate standard. Spre deosebire de traductorii convenționali, care trebuie deplasați pe suprafața piesei inspectate, traductorii phased array pot baleia cu fasciculul de ultrasunete proba sub diferite unghiuri, fără a fi nevoie să fie deplasați (explorare sectorială). De asemenea, aceștia au posibilitatea realizării unei focalizări dinamice la mai multe adâncimi diferite (focalizare electronică). Focalizarea electronică permite optimizarea formei și dimensiunii fasciculului în vederea optimizării probabilității de detectare și localizare a unui defect.

Explorarea sectorială este aplicată în mod special la inspecția îmbinărilor sudate. Capacitatea de examinare a sudurilor cu unghiuri multiple, folosind o singură sondă, crește enorm probabilitatea de detectare a defectelor. Posibilele dezavantaje ale acestor sisteme (senzori și echipamente de achiziție și prelucrare a semnalelor) sunt costul mai ridicat și necesitatea de pregătire suplimentară a operatorilor. Cu toate acestea, aceste costuri sunt frecvent compensate printr-o mai mare flexibilitate și reducere a timpului necesar pentru realizarea unei anumite inspecții.

5.7 Cuplantul

Cuplantul este, în general, un material lichid care facilitează transmiterea ultrasunetelor de la traductor la materialul inspectat. Necesitatea utilizării unui cuplat apare datorită diferenței mari între impedența acustică a aerului și impedența acustică a materialului inspectat.

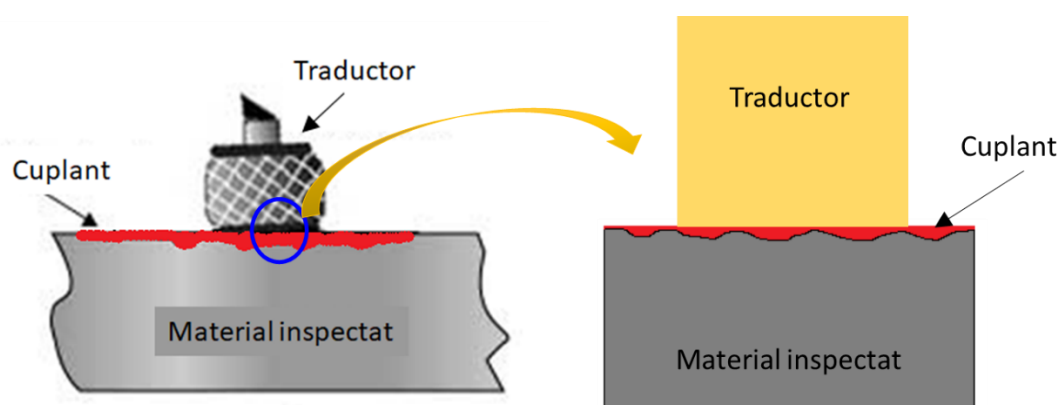


Figura 25. Rolul cuplantului în controlul nedistructiv cu ultrasunete.

În absența cuplantului, aproape întreaga energie a fasciculului de ultrasunete va fi reflectată la interfața dintre traductor și material și doar o mică parte va ajunge în material. Cuplantul elimină aerul dintre traductor și piesa inspectată, permițând astfel fasciculului de ultrasunete să penetreze piesa. În cazul traductoarelor de contact, pe post de cuplant, se poate folosi un film subțire de ulei, glicerină sau apă. În cazul utilizării apei, aceasta va conține substanțe pentru creșterea gradului de umectare a suprafeței sau inhibitori ai coroziunii. Dacă inspecția se face cu unde transversale, cuplantul trebuie astfel ales încât să aibă o vâscozitate cât mai mare, pentru a permite o propagare eficientă a acestui tip de unde. În cazul unei scanări în imersie, nu este nevoie să adăugăm un film subțire de cuplant pe suprafața piesei, deoarece atât traductorul cât și piesa inspectată se afla imersate în cuplant care este, în marea majoritate a cazurilor, apa. Acest fel de a realiza cuplajul între traductor și piesă garantează un cuplaj de

bună calitate, constant, atunci când se deplasează traductorul sau piesa în vederea realizării scanării.

5.8 Examinarea cu metoda impulsului reflectat (puls-ecou)

Metoda constă în utilizarea unui palpator normal sau unghiular care îndeplinește funcția dublă de emisie și recepție. Impulsurile sunt transmise intermitent în piesa examinată, iar în timpul pauzei dintre două emisii sunt recepționate impulsurile reflectate. În cazul în care ultrasunetele întâlnesc un defect, pe ecranul echipamentului vor apărea 3 ecouri. Primul ecou este dat de reflexia ultrasunetelor de pe suprafața s_1 și este cunoscut sub denumirea de ecou inițial sau impuls de emisie. Ecoul de fund este dat de reflexia ultrasunetelor de pe suprafața s_2 care reprezintă capătul piesei. Între aceste două ecouri apare ecoul dat de reflexia ultrasunetelor de către defect. Ecoul de defect apare pe ecran la o distanță corespunzătoare poziției acestuia în piesă.

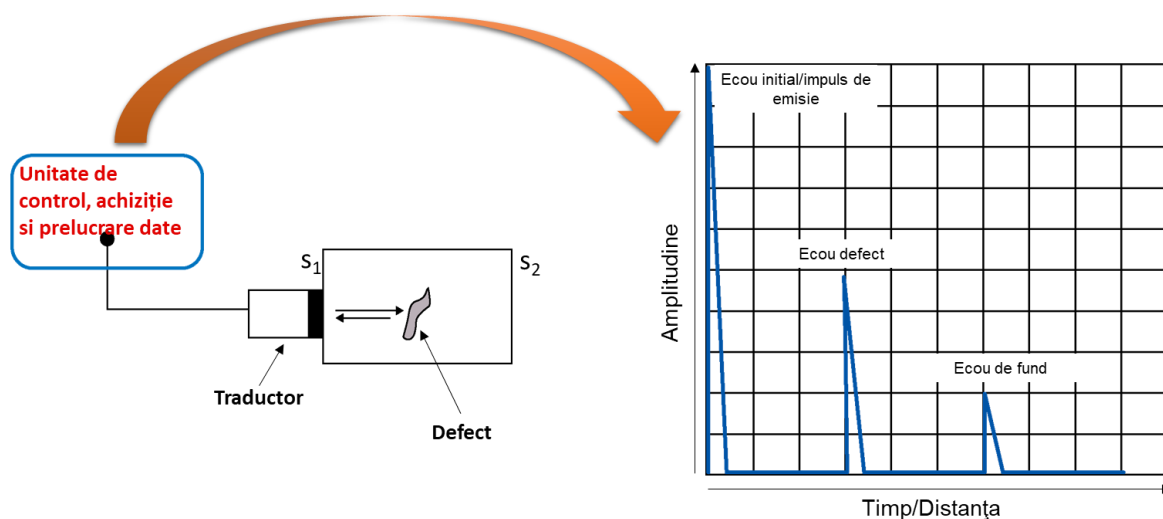


Figura 26. Principiul examinării cu metoda impulsului reflectat.

Dacă defectul se află în mijlocul piesei, ecoul defectului va apărea la mijlocul distanței între ecoul inițial și ecoul de fund. Echipamentele care utilizează metoda impulsului reflectat măsoară simultan doi parametri: (i) amplitudinea semnalului reflectat de o discontinuitate și (ii) durata necesară deplasării fascicolului de ultrasunete între suprafața de intrare și suprafața discontinuității ce îl reflectă. Detectarea unui defect existent în probă depinde foarte mult de geometria și de orientarea lui în raport cu suprafața probei. Câteva exemple care pun în evidență aceste aspecte sunt prezentate în figura 27. Se poate observa că, în cazul defectelor liniare de tip fisură, rezultate optime se obțin dacă fascicolul de ultrasunete intersectează suprafața defectului sub un unghi de 90° . Pe lângă orientarea defectului în raport cu fascicolul de ultrasunete, lungimea de undă a ultrasunetelor influențează în mod hotărâtor dimensiunea minimă a defectelor detectabile. Astfel, se consideră că dimensiunea unui defect detectabil nu poate fi mai mică decât jumătate din lungimea de undă a fascicolului de ultrasunete.

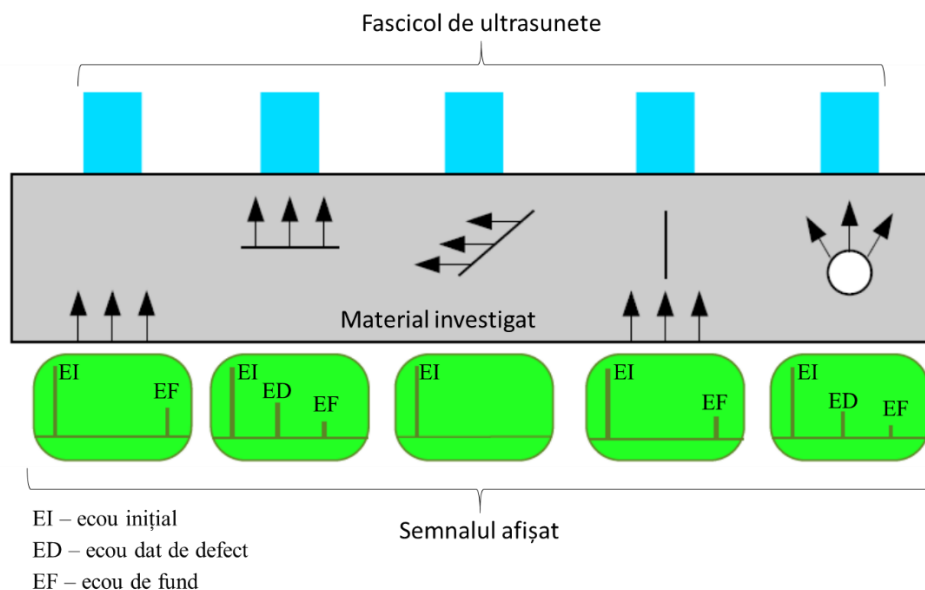


Figura 27. Influența formei și orientării defectului asupra semnalului afișat de echipamentul de control nedistructiv [8].

Pe lângă metoda impulsului reflectat, care este metoda cea mai des folosită, mai există și metoda prin transmisie. Pentru această metodă se folosesc doi traductori: unul are rolul de transmițător, iar celălalt este receptorul. Atunci când fascicolul de ultrasunete întâlnește o discontinuitate, acesta este distorsionat sau chiar anulat. Un mare dezavantaj al acestei tehnici este acela că poziționarea celor doi traductori trebuie să fie foarte riguroasă (axele celor doi traductori trebuie să fie colineare).

5.9 Moduri de prezentare a datelor

Există mai multe moduri de prezentare a rezultatelor unui control nedistructiv cu ultrasunete, dintre acestea cele mai des întâlnite sunt: prezentarea de tip A (A-scan), prezentarea de tip B (B-scan) și prezentarea de tip C (C-scan).

5.9.1 Prezentarea de tip A

Acest tip de prezentare a rezultatelor arată intensitatea semnalului reflectat în funcție de timp. Intensitatea semnalului recepționat de către palpator este reprezentată pe ordonată, în timp ce durata de timp între emisia ultrasunetelor și recepția semnalului reflectat este reprezentată pe abscisă. În acest tip de prezentare, dimensiunea unui defect poate fi estimată prin compararea amplitudinii semnalului dat de acesta cu amplitudinea semnalului dat de un defect a cărui dimensiune este cunoscută. Adâncimea la care se afla un defect în proba se poate determina pe baza poziției ecoului pe axa timpului. Cunoscând viteza ultrasunetelor în materialul examinat și durata dintre emisia ultrasunetelor și recepția semnalului reflectat (aparitia ecoului dat de defect), se poate determina foarte ușor adâncimea la care se afla defectul. Trebuie menționat că investigația pe suprafața probei se face punctual prin deplasarea traductorului pe suprafața probei.

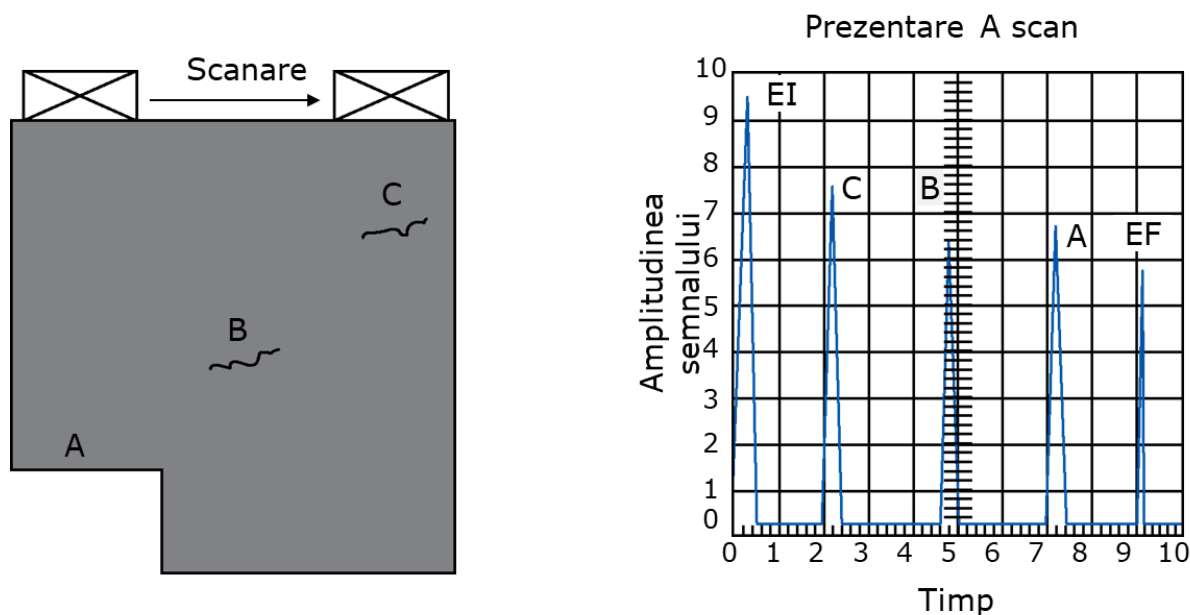


Figura 28. Prezentarea de tip A a datelor obținute în urma unei investigații cu ultrasunete [4].

Să considerăm exemplul din figura 28. După o durată foarte scurtă de timp după emiterea ultrasunetelor (foarte aproape de zero) pe ecranul aparatului va apărea un prim impuls corespunzător ecoului inițial (EI). Atunci când traductorul va scana suprafața probei, așa cum este arătat în figura 28, pe ecranul echipamentului vor mai fi observate încă 4 ecouri care apar la momente diferite (vor avea poziții diferite pe axa timpului). Când traductorul se află în poziția inițială, doar ecoul inițial și ecoul dat de suprafața A vor fi observate. Deplasarea spre dreapta a traductorului va conduce la apariția ecoului de fund (EF), după o durată de timp mai mare comparativ cu poziția ecoului dat de suprafața A. Acest lucru sugerează ca ultrasunetele au parcurs o distanță mai mare până au ajuns la această suprafață, în comparație cu suprafața A. Atunci când traductorul ajunge deasupra defectului notat cu B, pe ecranul echipamentului, între ecoul inițial și ecoul de fund (aproximativ la jumătate distanța dintre ele), va mai apărea un nou ecou dat de defectul B. Atunci când traductorul ajunge deasupra defectului C, ecoul dat de acesta se va observa pe ecranul echipamentului într-o poziție apropiată de a ecoului inițial. Acest lucru este natural deoarece defectul C este situat relativ aproape de suprafața scanată, iar durata între emiterea ultrasunetelor și recepția ultrasunetelor reflectate de defectul C este cea mai scurtă (traseul ultrasunetelor o să fie scurt). Cel mai probabil ecoul dat de defectul B nu va mai fi observabil pe ecranul echipamentului în acest moment, deoarece ultrasunetele nu vor mai fi reflectate de acesta.

5.9.2 Prezentarea de tip B

La acest tip de prezentare, abscisa reprezintă distanța parcursă de palpator iar ordonata reprezintă timpul de parcurs al impulsului (timpul scurs între emisia impulsului și recepția impulsului reflectat). Inspekția se face de-a lungul unei linii pe suprafața piesei iar pe ecranul echipamentului este prezentată practic o secțiune a acesteia. Acest mod de prezentare permite

determinarea ușoară a formei defectului, cunoscând permanent lungimea și adâncimea discontinuităților din material.

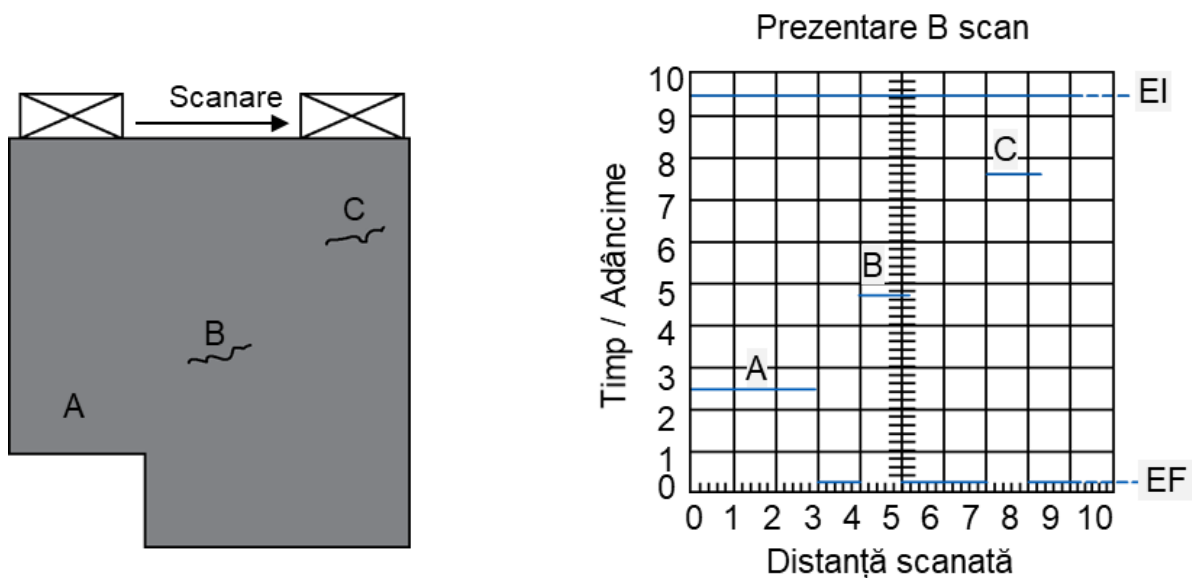


Figura 29. Prezentarea de tip B a datelor obținute în urma unei investigații cu ultrasunete [4].

Trebuie menționat că un mare dezavantaj a acestui mod de prezentare este acela că anumite defecte din profunzime pot fi mascate de defecte de dimensiuni mai mari, situate mai aproape de suprafața piesei.

5.9.3. Prezentarea de tip C

Această prezentare oferă proiecția plană a zonei examinate, controlul făcându-se pe toată suprafața piesei. Defectele interne sunt proiectate în plan, ca și cum piesa ar fi străbătută pe toată suprafața sa de un fascicul normal de ultrasunete.

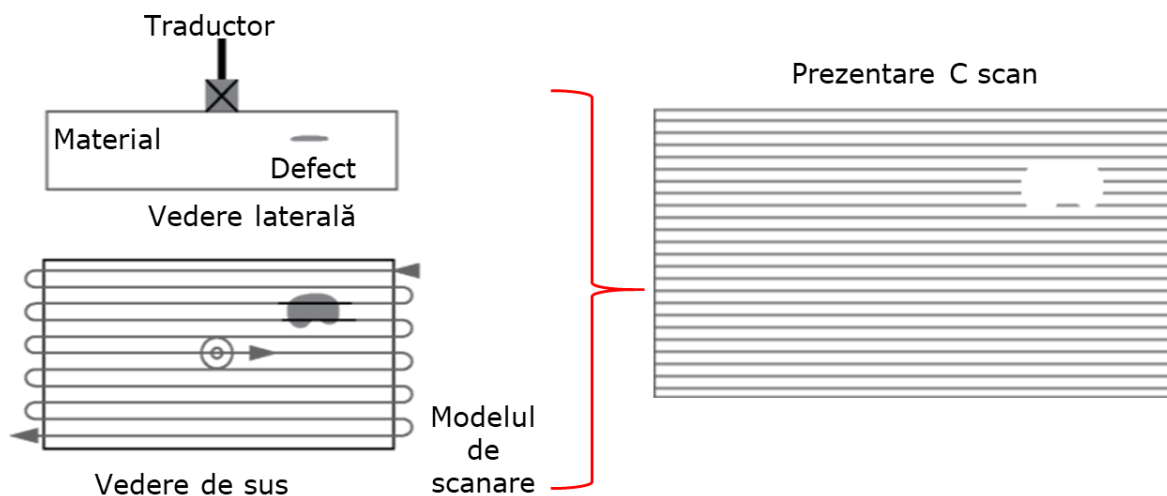


Figura 29. Prezentarea de tip C a datelor obținute în urma unei investigații cu ultrasunete [4].

Dacă materialul prezintă defecte, procedeul acesta va pune în evidență conturul defectelor. Acest tip de scanare este posibil doar cu echipamente automatizate care permit baleierea întregii suprafețe a probei, având o foarte bună sincronizare între deplasarea de-a lungul axei Ox respectiv Oy .

5.10 Calibrarea echipamentelor de control cu ultrasunete

Pentru ca rezultatele unui control nedistructiv cu ultrasunete să fie corecte și reproductibile, este necesar ca înaintea realizării unui control să se realizeze operația de calibrare/etalonare a echipamentului utilizat. Calibrarea echipamentelor de control nedistructiv cu ultrasunete se realizează cu ajutorul unor blocuri de calibrare (de referință) diferite, confecționate din același material sau un material cu caracteristici acustice cât mai apropiate de a materialului ce urmează să fie supus controlului. De exemplu, se acceptă o diferență de maxim 3% între caracteristicile acustice ale materialului blocului de referință și caracteristicile acustice ale materialului piesei supuse controlului.

Operația de calibrare vizează, în principiu, următoarele două aspecte [10]:

- (i) Etalonarea și reglarea aparatului propriu zis care constă în:
 - etalonarea scării de măsurare a distanțelor și controlul proporționalității scării distanțelor;
 - reglarea sensibilității;
 - liniaritatea amplificării, determinarea zonei moarte;
 - determinarea puterii separatoare.
- (ii) Calibrarea traductorului, aceasta constând în:
 - determinarea punctului de incidență a fascicolului;
 - verificarea unghiului de refracție;
 - verificarea devierii axei longitudinale a fascicolului;
 - corecția punctului de zero;
 - ridicarea caracteristicii de directivitate.

Cele mai folosite blocuri de referință pentru calibrarea echipamentelor de control nedistructiv cu ultrasunete sunt blocurile A_1 și A_2 . În figura 30 este prezentat blocul de referință A_1 . Acest tip de bloc se realizează din oțel nealiat, calmat, supus unei recoaceri de normalizare, pentru a se obține o microstructură uniformă de punctaj 8. Toate dimensiunile din figura 30a au o toleranță de $\pm 0,1$ mm. În orificiul străpuns cu diametrul de 50 mm se introduce un dop de plexiglas cu suprafața inferioară argintată. Dimensiunile cilindrului sunt astfel calculate, încât timpul total de propagare a undelor longitudinale, pe direcția axului cilindrului, să fie corespunzător parcurgerii unei grosimi de 50 mm oțel, adică 23 mm de plexiglas. Cu acest tip de bloc de referință se execută următoarele tipuri de calibrări și verificări [9]:

- calibrarea scării distanțelor;
- corecția punctului de zero;
- verificarea liniarității scării de măsurare a distanțelor (baza de timp) și a amplificării;
- verificarea și reproducerea sensibilității aparatului și a sensibilității de detecție;
- verificarea zonei moarte;
- verificarea puterii separatoare în adâncime;

- verificarea și determinarea punctului de incidență și de pătrundere al palpatoarelor unghiulare;
- trasarea caracteristicilor de directivitate în plan orizontal și vertical pentru palpatoare unghiulare;
- verificarea unor diferențe structurale între materialul din care este confecționat blocul de control și alte sortimente de oțel.

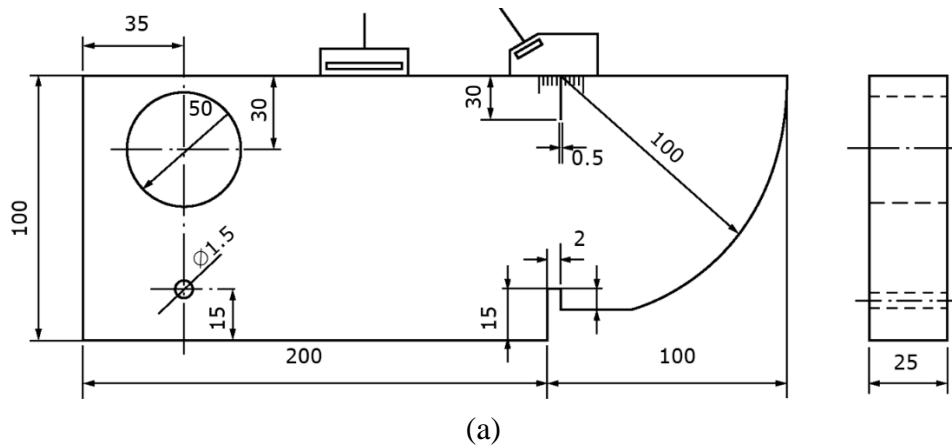


Figura 30. Dimensiunile nominale (a) și imaginea (b) blocului de referință A₁ [1, 4].

Blocul de referință A₂ este prezentat în figura 31. Acest tip de bloc, de dimensiuni mult mai mici, a apărut ca urmare a tendinței de miniaturizare a tehnicii și în mod special a palpatoarelor.

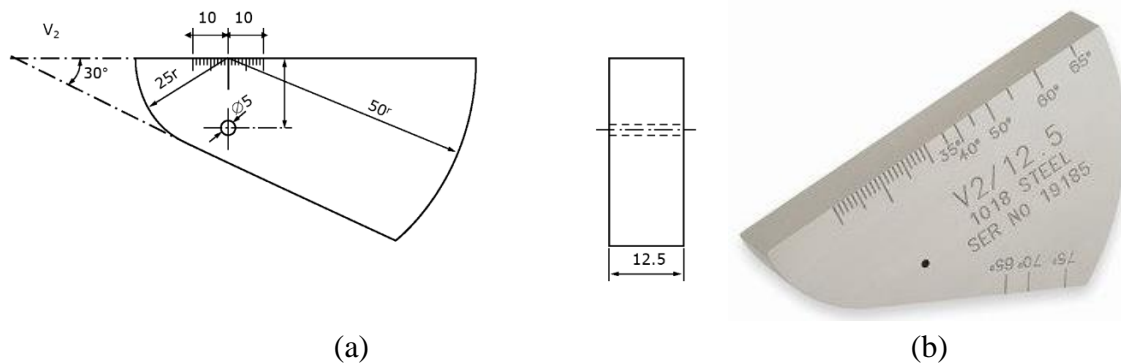
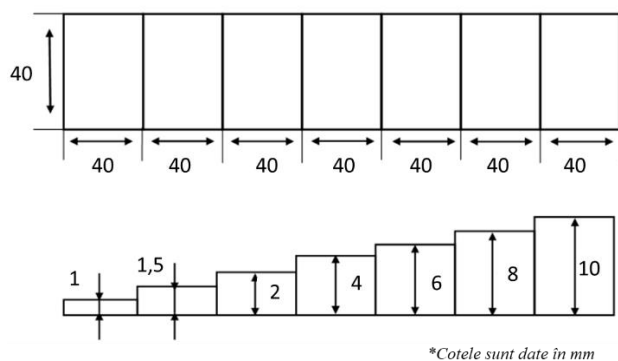


Figura 31. Dimensiunile nominale (a) și imaginea (b) blocului de referință A₂ [1,4].

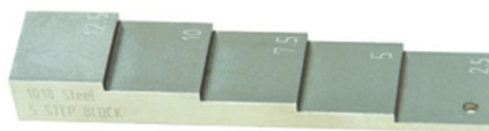
Materialul din care se confecționează în mod obișnuit acest tip de bloc de referință este identic cu cel folosit pentru blocul de referință A₁, iar toleranța dimensiunilor prezentate în figura 31a este de $\pm 0,1$ mm. Acest tip de bloc se poate utiliza pentru calibrarea și verificarea următorilor parametri:

- reglarea scării distanțelor ;
- reglarea sensibilității ;
- determinarea unghiului de incidență ;
- determinarea punctului de emisie a fascicolului.

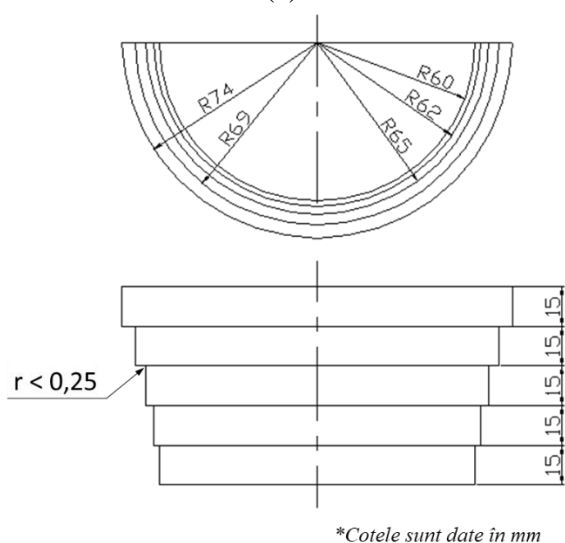
Pe lângă aceste două tipuri de blocuri de control (cele mai folosite) se mai folosesc și blocuri de control de tipul A₃ și A₄. În figura 32 sunt prezentate aceste tipuri de blocuri.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 32. Dimensiunile nominale (a) și imaginea (b) blocului de referință A₃. Dimensiunile nominale (c) și imaginea (d) blocului de referință A₄ [16].

Blocurile de referință de tipul A₃ se folosesc cu precădere la verificarea și calibrarea palpatoarelor cu cristal dublu, care folosesc unde longitudinale cu frecvență mare ($f > 6$ MHz) și zonă moartă mai mică decât 4 mm. Acest tip de bloc de referință servește la calibrarea scării de măsurare a distanțelor în domeniul 5 – 20 mm, corecția punctului de zero și verificarea separării etapei de emisie de etapa de recepție. Blocul de calibrare de tipul A₄ (figura 32 c și d)

este o piesă semicilindrică în 5 trepte, cu diametre cuprinse între 120 și 148 mm, și se folosește în mod special pentru determinarea puterii separatoare în adâncime a întregului echipament de control (unitate centrală și palpator). Folosind acest tip de bloc pot fi verificate și etalonate atât palpatoarele normale cât și cele inclinate.

Datorită cerinței ca proprietățile acustice ale blocului de referință să fie cât mai apropiate (ideal identice) cu proprietățile acustice a materialului ce urmează a fi supus controlului, toate tipurile de blocuri de referință prezentate mai sus pot fi realizate dintr-o gamă foarte largă de materiale și aliaje precum: diferite tipuri de oțeluri inoxidabile, aliaje cu baza aluminiu, aliaje cu baza cupru, aliaje cu baza titan, aliaje cu baza zirconiu, diferite tipuri de fonte de turnatorie, aliaje cu baza nichel etc.

5.11 Determinarea poziției unui defect

Determinarea poziției unui defect într-o probă supusă controlului cu ultrasunete se poate face atât cu traductori normali (fascicolul de ultrasunete este perpendicular pe suprafața probei), cât și cu traductori unghiulari (fascicolul de ultrasunete este incident pe suprafața probei sub un anumit unghi). Prin metoda impulsului reflectat (metoda puls-ecou), folosind un traductor normal, determinarea poziției unui defect se face măsurând timpul necesar ca un puls de ultrasunete emis de traductor să străbată materialul, să se reflecte de pe suprafața defectului (suprafața de separație între două medii cu caracteristici acustice diferite) și să ajungă înapoi la traductor. În marea majoritate a cazurilor, această durată de timp este de ordinul milisecundelor sau chiar mai mică. Ținând cont că această durată de timp reprezintă durata în care ultrasunetele străbat dublul distanței dintre palpator și defect (dus-întors), aceasta trebuie împărțită la doi pentru a afla timpul necesar ca ultrasunetele să ajungă la defect. Cunoscând viteza de propagare a undelor în materialul supus controlului, se poate determina poziția exactă a defectului cu ajutorul următoarei relații [1]:

$$d = \frac{V \cdot t}{2} \quad (11)$$

unde d este distanța dintre suprafața probei verificate și defect, V este viteza ultrasunetelor în materialul supus controlului și t este durata de timp dintre emisia ultrasunetelor și recepția ultrasunetelor reflectate.

Dacă înaintea controlului s-a realizat operația de etalonare a scării distanțelor, distanța „ d ” poate fi citită direct de pe ecranul echipamentului. În același mod se poate determina și grosimea unui material, luând în calcul timpul necesar ca ultrasunetele să se propage în material și viteza de propagare a acestora în materialul considerat. Luând în calcul cele menționate mai sus, putem trage concluzia logică că, cu cât semnalul dat de un defect se observă, pe scara timpului, mai repede (la timpi mici), cu atât acesta se afla mai aproape de suprafața probei (suprafața scanată cu palpatorul). Această concluzie este prezentată grafic în figura 33.

Traductorii de precizie pentru echipamentele cu ultrasunete funcționează de regulă la frecvențe cuprinse între 500 kHz și 100 MHz. Pentru a satisface nevoile aplicațiilor industriale, au fost dezvoltate o mare varietate de traductoare cu diferite caracteristici acustice. În mod obișnuit, frecvențele mai joase sunt utilizate pentru a optimiza penetrarea fascicolului de

ultrasunete în material, atunci când se măsoară materiale groase, extrem de atenuante sau foarte dispersive. Frecvențele mai mari vor fi recomandate pentru a optimiza rezoluția în materialele mai subțiri, non-atenuante și non-dispersive. Reamintim că, pentru a avea șanse ca un defect să fie detectat, dimensiunea acestuia nu trebuie să fie mai mică decât jumătate din lungimea de undă a ultrasunetelor folosite în cadrul controlului respectiv.

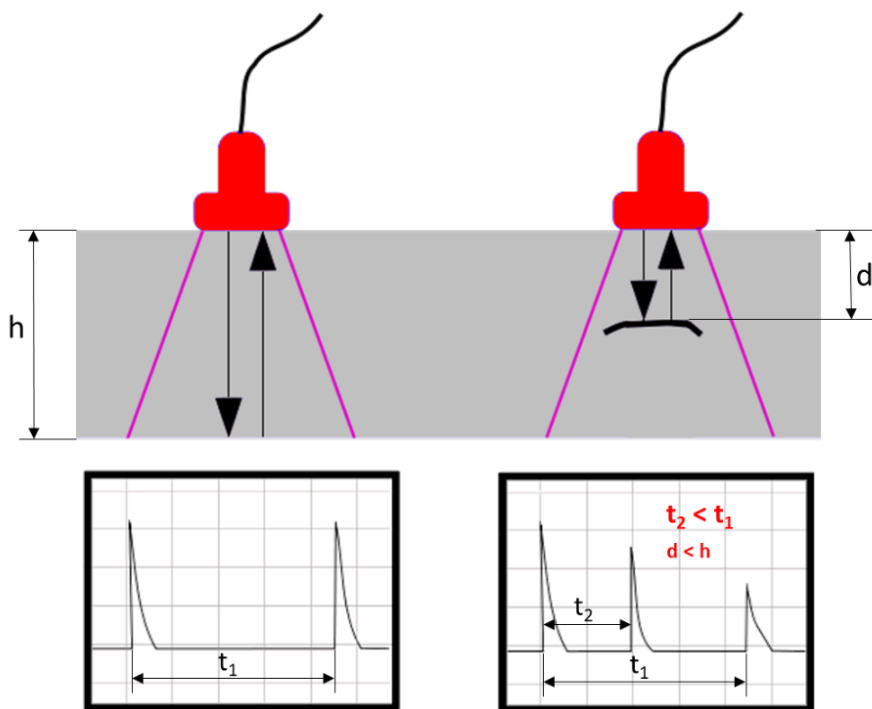


Figura 33. Determinarea distanței dintre suprafața probei și un defect folosind metoda impulsului reflectat și un palpator normal.

Controlul nedistructiv cu ultrasunete permite măsurarea rapidă și fiabilă a grosimii semifabricatelor sau pieselor finite, fără a fi nevoie de acces pe ambele părți ale acestora. În anumite aplicații se poate obține o precizie de până la ± 1 micrometru. Această tehnică permite controlul sau măsurarea mării majorității a materialelor folosite în practică: materiale metalice, materiale plastice, materiale ceramice, materiale compozite, materiale vitroase, etc. De asemenea, această tehnică se pretează la măsurarea în timp real (în timpul procesului de producție), fiind aplicată cu succes la controlul produselor extrudate sau laminate.

Dacă se folosesc traductori unghiulari/traductori înclinați, trebuie să ținem cont de faptul că aceștia se folosesc pentru a induce în material un fascicul refractat de unde transversale. Incidența oblică a fascicolului de ultrasunete crește șansele de detectare a unui defect, fiind extrem de folosită în cazul controlului nedistructiv al îmbinărilor sudate. Controlul cu palpatoare înclinate este diferit de controlul cu palpatoare normale, deoarece în cazul folosirii palpatoarelor înclinate ecoul de fund, dat de reflexia fascicolului de pe suprafața inferioară a probei, nu o să mai apară pe ecranul echipamentului la fel ca în cazul folosirii palpatoarelor normale. La folosirea palpatoarelor înclinate, pe ecranul echipamentului nu va apărea nici un ecou, decât în cazul prezenței unui defect de dimensiune și orientare propice, care să fie intersectat de fascicolul de ultrasunete. Dacă prin deplasarea palpatorului pe suprafața probei

se asigură intersectarea defectului cu axa centrală a fascicolului de ultrasunete, pe ecranul echipamentului se va observa ecoul dat de defect.

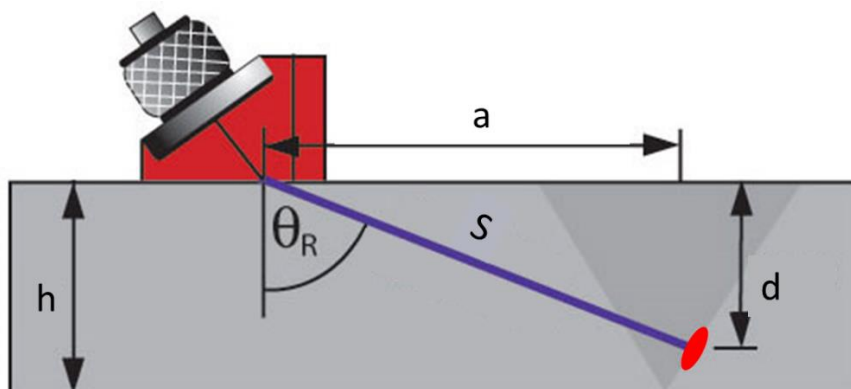


Figura 34. Determinarea poziției unui defect folosind palpatoare înclinate [4, 7].

Folosind relația 11 se poate calcula distanța „S” dintre defect și punctul în care ultrasunetele părăsesc palpatorul respectiv intră în material (punct de incidență). Trebuie menționat că în relația 11 se va introduce valoarea vitezei de propagare a undelor transversale în materialul supus controlului. Pentru poziționarea defectului ne interesează distanța „a”, care reprezintă distanța dintre proiecția defectului și punctul de incidență pe suprafața piesei, precum și adâncimea „d” a defectului față de suprafața pe care se execută palparea. Aceste două mărimi se pot calcula cu ajutorul relațiilor 12 și 13 [4]:

$$a = S \cdot \sin \theta_R \quad (12)$$

$$d = S \cdot \cos \theta_R \quad (13)$$

unde θ_R reprezintă unghiul de refracție. Acesta poate fi specificat pe palpator, poate fi calculat sau poate fi determinat prin etalonare.

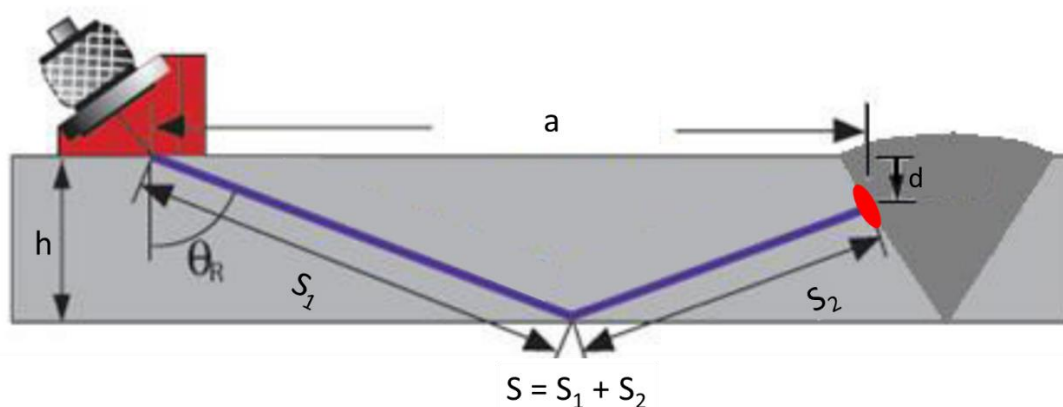


Figura 35. Determinarea poziției unui defect folosind palpatoare înclinate [4, 7].

Există situații în care fascicolul de ultrasunete intersectează un defect, după ce fascicolul respectiv a suferit o reflexie de pe suprafața inferioară a probei. Această situație este prezentată în figura 35. În această situație, valoarea lui „a” se calculează folosind relația 12, iar adâncimea la care se află defectul se poate calcula cu relația [7]:

$$d = 2h - (\cos \theta_R \cdot S) \quad (14)$$

unde S reprezintă suma distanțelor de la palpator la suprafața inferioară a probei (S_1) și de la suprafața inferioară a probei la defect (S_2).

5.12 Avantajele și dezavantajele controlului nedistructiv cu ultrasunete

Principalele avantaje ale controlului nedistructiv cu ultrasunete sunt:

- este o tehnică cu ajutorul căreia se pot detecta defecte de suprafață sau din profunzimea piesei;
- pot fi detectate defecte aflate la adâncimi mari, defecte nedetectabile cu celelalte tehnici de control nedistructiv;
- dacă se folosește tehnica impulsului reflectat, este necesar accesul la o singură suprafață a piesei controlate;
- este o tehnică foarte precisă pentru determinarea poziției defectelor și estimarea dimensiunii și formei acestora;
- pregătirea suprafeței probei înaintea controlului este minimă;
- rezultatele se obțin în timp real;
- folosirea unor echipamente automatizate permite obținerea unor imagini detaliate a defectelor;
- nu este periculoasă pentru operator sau pentru persoanele aflate în apropiere;
- nu afectează materialul supus controlului;
- pe lângă detectarea defectelor, această tehnică poate fi folosită și la măsurarea grosimii sau lungimii unor semifabricate;
- este o tehnică cu un înalt grad de portabilitate și se pretează automatizării.

Principalele dezavantaje ale controlului nedistructiv cu ultrasunete sunt următoarele:

- necesită personal cu un grad de specializare superior altor tehnici de control nedistructiv;
- necesită un agent de cuplaj care să permită transmiterea ultrasunetelor în piesa supusă controlului;
- materialele cu rugozitate mare, cu forme neregulate, cu dimensiuni foarte mici, neomogene sau excepțional de subțiri sunt dificil de controlat cu această tehnică;
- fontele de turnatorie sau alte materiale cu granulație grosolană sunt greu de analizat datorită atenuării puternice a ultrasunetelor și raportului semnal/zgomot scăzut;
- defectele liniare orientate paralel cu direcția de propagare a fascicolului de ultrasunete pot scăpa neobservate;
- necesită blocuri de referință pentru calibrare și verificare, blocuri ce trebuie să fie din materiale cu caracteristici acustice apropiate de cele ale materialului supus controlului.

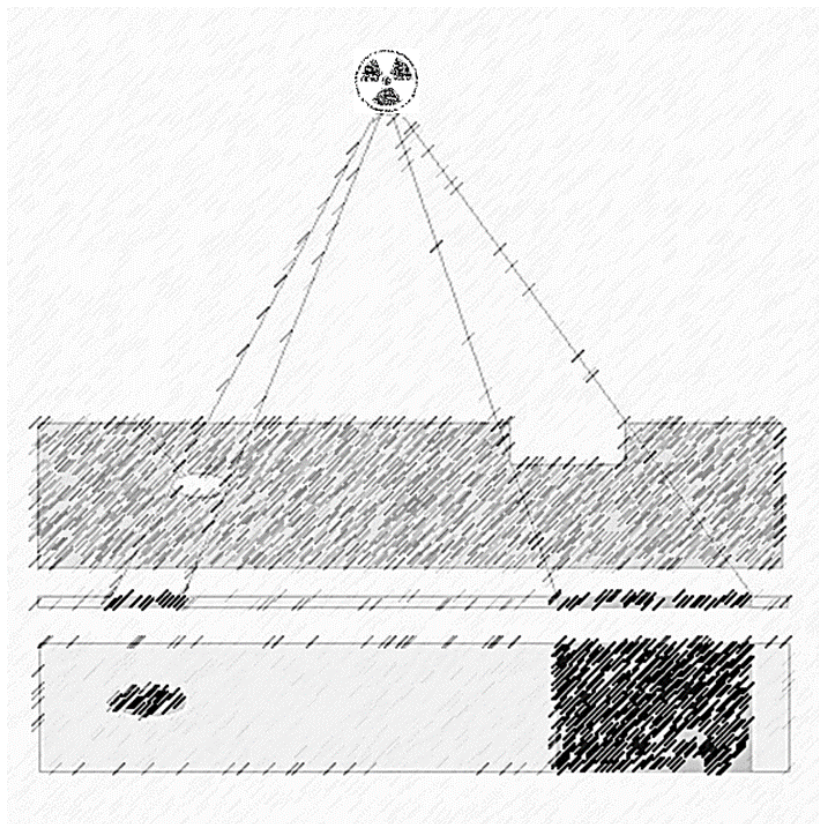
5.13 Bibliografie

- [1] C. J. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation, Editura The McGraw-Hill Companies, Inc. 2001, ISBN: 13: 978-0071777148
- [2] T. Luthi, Non-Destructive Evaluation Methods, 2013, disponibil online: [https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20\(2014\).pdf](https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20(2014).pdf)*
- [3] M. Bodea, Sudarea și procedee conexe, Editura UT Press, Cluj Napoca 2016, 978-606-737-143-7.
- [4] https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm*
- [5] B. Bolt, Earthquakes, editia 5, Editura Earthquakes, 2008, ISBN 978-0716756187.
- [6] Albert S Birks; Robert E Green; Paul McIntire, Nondestructive testing handbook. Volumul 7, Ultrasonic testing, Editura American Society for Nondestructive Testing, 1991, ISBN 0931403049
- [7] A. Hijazi, Introduction to Non-Distructive Testing Technique, disponibil online: <https://eis.hu.edu.jo/acuploads/10526/ultrasonic%20testing.pdf>*
- [8] T. Luthi, Non-Destructive Evaluation Methods, 2013, disponibil online: [https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20\(2014\).pdf](https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20(2014).pdf)*
- [9] P. Ciorău, D. Coca, I. Crudu et al. Încercarea Materialelor, Controlul nedistructiv al materialelor, Editura Tehnică, Bucuresti 1986.
- [10] Voicu Ionel Safta, Voicu Ioan Safta, Defectoscopie nedistructivă industrială, Editura Tehnică, Timișoara, 2001, ISBN 973-99425-6-3.
- [11] K. Uchino, Advanced Piezoelectric Materials, The development of piezoelectric materials and the new perspective, Editura Woodhead Publishing, 2010, ISBN 9781845695347.
- [12] P. Dineva, D. Gross, R. Müller, T. Rangelov, Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials, Editura Springer International Publishing, 2014, ISBN 13: 9783319378138
- [13] OLYMPUS, Ultrasonic Weld Inspection Solutions, disponibil online: <http://www.olympus-ims.com/en/resources/>*
- [14] T. Nelligan, An Introduction to Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing, disponibil online: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/intro-ultrasonic-transducers-ndt-testing/>*
- [15] M. Zelenyak, R. Oster, M. Mosch, P. Jahnke, M.G.R. Sause, Numerical Modeling of Ultrasonic Inspection in Fiber Reinforced Materials with Explicit Microstructure, Proceedins of 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016, disponibil online: <https://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/fr1d3.pdf>*
- [16] <https://www.advantagendt.com/ultrasonic-calibration-blocks/>*

* Surse bibliografice disponibile online la data de 09.01.2019

Capitolul 6

Controlul nedistructiv cu radiații penetrante



6.1 Introducere

Dezvoltarea controlului nedistructiv cu radiații X își are originea în activitatea de cercetare a profesorului german Wilhelm Conrad Röntgen. Acesta, în 1895, făcea experimente cu un tub catodic (tub Crooke), când a observat că un panou fluorescent din laboratorul său a început să strălucească. Acesta a remarcat că fenomenul de fluorescență a panoului apare și atunci când tubul catodic este acoperit cu hârtie groasă neagră, trăgând concluzia că razele emise de tub au capacitatea de a penetra obiecte. Totodată, Röntgen a observat că panoul fluorescent strălucește cu atât mai tare cu cât distanța dintre panou și tub este mai mică. Au urmat o serie de experimente în care Röntgen a așezat între tubul catodic și panoul fluorescent diverse obiecte precum: o cutie din lemn cu greutate metalice, yala de la ușă, o armă de vânatoare încărcată, cărți și chiar propria mână. Prima radiografie a unei părți umane este înregistrată ca aparținând mâinii soției lui Röntgen, observându-se pe aceasta clar oasele degetelor și verigheta. Descoperirea lui Röntgen a fost primită cu mult entuziasm de lumea științifică a acelor vremuri și, în scurt timp după mediatizarea rezultatelor cercetării, razele X au fost folosite în medicină pentru investigarea diferitelor fracturi. Pentru descoperirea razelor X, Wilhelm Conrad Röntgen a primit premiul Nobel în fizică în anul 1901 [1, 2].

În anul 1896, cercetătorul francez Henri Becquerel studia radiațiile emise de materiale luminescente (săruri de uraniu) în încercarea de a demonstra că, pe lângă lumina vizibilă emisă de aceste materiale, ele mai emit și radiații invizibile care pot penetra anumite obiecte. Pentru a testa această ipoteză, el a plasat cristale fluorescente (care au fost în prealabil excitate cu lumină naturală) pe o placă fotografică, ce a fost înfășurată în hârtie neagra opacă, astfel încât numai eventualele radiații penetrante emise de material să ajungă la emulsia fotosensibilă. După o anumită perioadă, Becquerel a observat că pe placa fotografică au fost impresionate formele materialelor fluorescente. A continuat experimentele demonstrând că, dacă o monedă este interpusă între materialul fosforescent și placa fotografică, imaginea acesteia o să apară definită pe placa fotografică. Becquerel a raportat această descoperire la Academia de Științe în sesiunea din 24 februarie 1896, menționând că anumite săruri ale uraniului emit radiații penetrante similare cu radiațiile X.

Spre deosebire de descoperirea razelor X de către Röntgen, care s-a bucurat de un interes deosebit din partea oamenilor de știință ale acelor vremuri, descoperirea lui Becquerel (radioactivitatea naturală) a trecut aproape neobservată. Subiectul radioactivității naturale a ajuns în prim-planul lumii academice doi ani mai târziu (1898), odată cu descoperirea elementului chimic Radium de către soții Curie (Pierre și Marie Curie). Soții Curie studiau prezența unor elemente radioactive în minereurile de uraniu. În urma studiilor, aceștia au descoperit două noi elemente radioactive, Poloniu și Radium care erau mult mai radioactive decât Uraniumul. După aceste descoperiri, o serie întreagă de elemente radioactive au fost descoperite sau produse artificial. Radiumul a fost folosit prima dată ca sursă industrială radioactivă, permițând realizarea unor controale nedistructive cu radiații penetrante pe piese turnate cu pereți groși de 10 – 12 inch (254 – 304,8 mm). Pentru descoperirea radioactivității, Henri Becquerel, Marie Curie și Pierre Curie au primit premiul Nobel în fizică în anul 1903 [1, 2].

Primul laborator de control nedistructiv cu radiații penetrante a fost înființat în anul 1922, iar primele investigații radiografice ale unei îmbinări sudate au fost înregistrate cu ajutorul unui tub de raze X (tensiune de accelerare 250 kV, curent 5 mA), în anul 1972.

Primul izotop radioactiv artificial a fost obținut în Paris în anul 1934 de către Frédéric Joliot și Irène Joliot-Curie, prin bombardarea aluminiului cu particule alfa. Pentru punerea bazelor sintezei izotopilor radioactivi, aceștia au primit premiul Nobel în chimie în anul 1935 [1, 2]. Realizarea surselor radioactive din izotopi radioactivi artificiali, folosite în cadrul examinărilor nedistructive, a luat amploare după cel de-al doilea război mondial. La începutul anilor '60, Allan Cormack a pus bazele teoretice ale tomografiei computerizate, iar Godfrey Hounsfield a construit primul echipament disponibil comercial de tomografie computerizată. Cei doi cercetători au primit premiul Nobel în medicină în anul 1979 [1, 2].

În multe privințe, controlul cu radiații penetrante nu s-a schimbat (în esență) de-a lungul istoriei. Înregistrarea radiografiei unei probe se face tot pe un film radiografic, folosind proceduri similare cu cele implementate la începuturile acestei tehnici. Cu toate acestea, în zilele noastre suntem capabili să înregistrăm radiografii de calitate superioară, prin utilizarea unor filme de calitate superioară, sau prin prelucrarea automată a filmelor. Evoluția electronicii și utilizarea calculatoarelor și-au adus aportul la dezvoltarea acestei tehnici de control nedistructiv, conducând la apariția radiografiei digitale. Astfel, înregistrarea imaginii, prelucrarea (îmbunătățire digitală) și arhivarea acesteia sub formă digitală constituie un avantaj de necontestat. Progresele tehnologice înregistrate în acest domeniu au permis realizarea unor echipamente mai mici, mai ușoare și mai portabile, care produc raze X de înaltă energie, cu capacitate de penetrare sporită. În zilele noastre, controlul nedistructiv cu radiații penetrante (raze X sau raze gama) este una dintre cele mai importante și versatile tehnici de control nedistructiv, găsindu-și aplicații în aproape toate domeniile industriei moderne.

6.2 Principiul de bază al controlului nedistructiv cu radiații penetrante

Radiațiile X sau gama au proprietatea de a putea penetra substanțe, motiv pentru care sunt denumite radiații penetrante. Controlul nedistructiv cu radiații penetrante (raze X sau raze gama) constă în obținerea unei imagini a structurii macroscopice a materialului. Această imagine se obține prin înregistrarea pe un film radiografic (similar cu filmul fotografic) a radiațiilor ce penetrează proba. Astfel, pe film apare imaginea internă a materialului examinat, imagine care se formează pe baza atenuării diferite a radiațiilor penetrante de către neomogenitățile macroscopice prezente în material sau de variații ale grosimii acestuia. Schița de principiu a examinării cu radiații penetrante este prezentată în figura 1. Între sursa de radiații, care emite un fascicul de radiații de formă conică, și filmul radiografic se intercalează materialul supus examinării. O parte din radiația emisă de sursă va fi absorbită de probă iar o altă parte va trece prin probă impresionând filmul radiografic. Materialele cu densitate mare sau cu grosime mare vor absorbi o cantitate mai mare de radiații. Gradul de înnegrire a filmului radiografic variază în funcție de cantitatea de radiație care penetrează obiectul examinat.

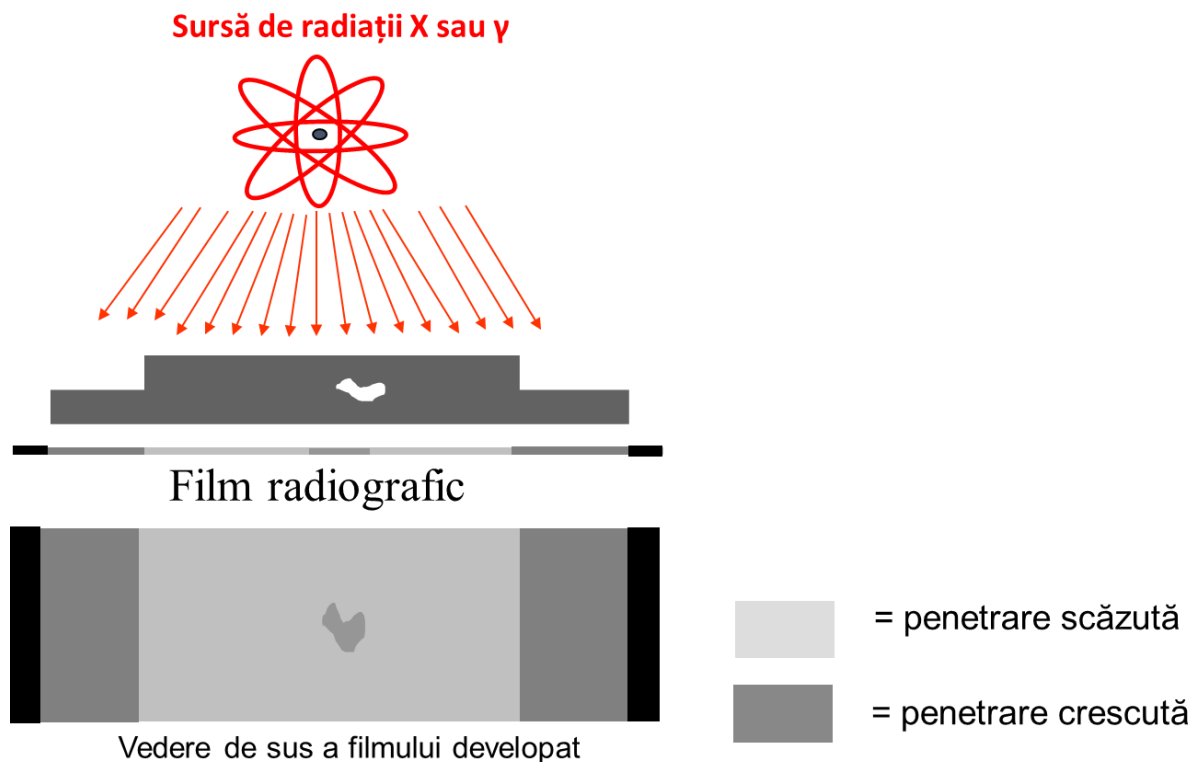


Figura 1. Schița de principiu a examinării cu radiații penetrante a unei probe care prezintă variații de grosime și goluri [3].

Se observă că filmul radiografic este înnegrit pe capete, ca urmare a faptului că în zonele respective un procent foarte mare (aproape 100 %) din radiația emisă de sursă ajunge direct la filmul radiografic (între sursă și film nu există nici un material). În funcție de grosimea materialului analizat, se poate observa, în figura 1, că apar zone de gri mai închis sau mai deschis. Acolo unde materialul are o grosime mai mare, cantitatea de radiații care va penetra materialul va fi mai mică, impresionând mai puțin filmul fotografic. În același timp, dacă materialul are goluri sau cavități, atenuarea fascicolului la trecerea prin acestea va fi mai mică, rezultând o cantitate mai mare de radiații care ajung la filmul radiografic. Putem spune că prezența unui gol în piesa examinată este percepută de radiațiile penetrante ca o variație (scădere) a grosimii materialului. În același timp, dacă materialul nostru ar prezenta o zonă cu neomogenitate chimică de dimensiuni macroscopice, caracterizată de densitate mai mare decât densitatea materialului de bază, zona corespunzătoare acestei neomogenități ar apărea pe filmul radiografic de o nuanță mai deschisă la culoare decât materialul de bază.

6.3 Radiații electromagnetice

Prin natura lor fizică, radiațiile X și radiațiile gama fac parte din familia radiațiilor electromagnetice alături de undele radio, microundele, radiațiile în infraroșu, radiațiile din spectrul vizibil și radiațiile ultraviolete. Reprezentarea acestor radiații în funcție de lungimile lor de undă (de la cele mai mari lungimi de undă la cele mai mici) poartă denumirea de spectrul radiațiilor electromagnetice. O reprezentare schematică a spectrului radiațiilor

electromagnetice, împreună cu lungimea de undă și frecvența caracteristică fiecărui tip de radiații, este dată în figura 2.

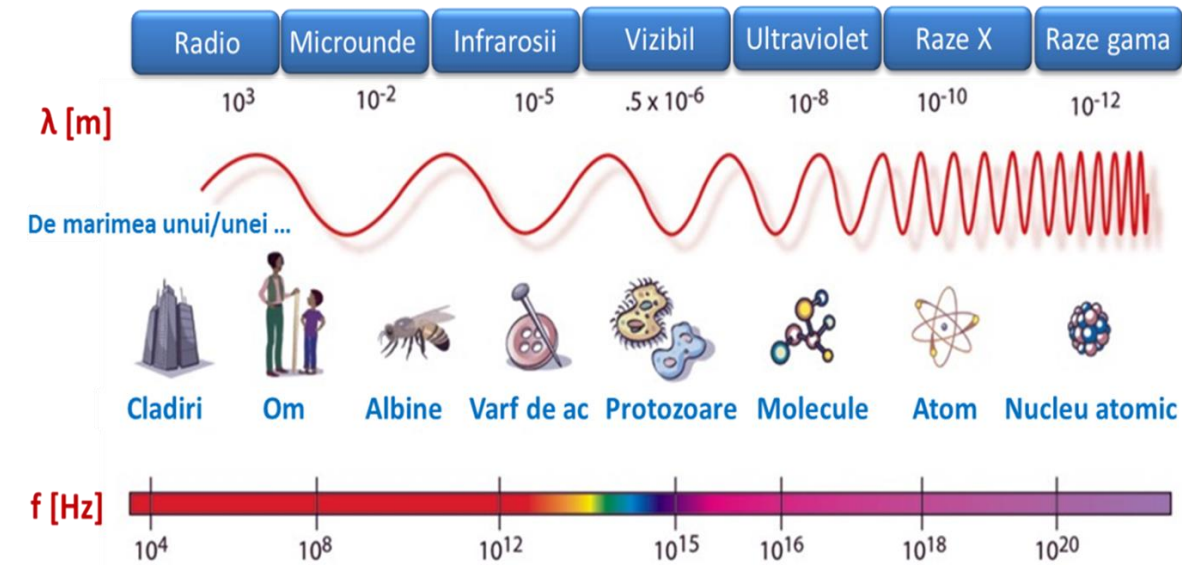


Figura 2. Spectrul radiațiilor electromagnetice. Pentru o mai bună percepere a lungimii de undă a radiațiilor electromagnetice, sub fiecare clasă de radiații sunt trecute obiecte sau organisme a căror dimensiune este comparabilă cu lungimea de undă a clasei de radiații [4].

Diferența semnificativă între razele X și razele gama (neluând în calcul lungimile de undă) este doar modul de producere a acestora, natura lor fiind identică. Razele X sunt produse cu ajutorul tuburilor de raze X ca urmare a frânării, într-un material, a unui fascicol de electroni accelerați sau ca urmare a unor tranziții cuantice a electronilor în nivelele inferioare ale atomilor. Pe de altă parte, razele gama sunt produse prin dezintegrarea nucleului izotopilor radioactivi (tranziții între două stări cuantice ale nucleului).

Radiațiile electromagnetice (inclusiv razele X și gama) prezintă caracter dual undă-corpusul, fiind compuse din cuante de energie denumite fotoni. Între frecvența radiațiilor electromagnetice (ν), lungimea de undă (λ) și viteza luminii (c) există următoarea relație:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

iar între energia unui foton (E) și frecvența lui există relația:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

unde h este constanta lui Planck ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s). Energia E se măsoară, de obicei, în electron-volți (eV), $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J. Din relațiile de mai sus rezultă că fotonii de energie mare vor avea frecvență mare și drept urmare lungime de undă mică.

Razele X și razele gama au următoarele caracteristici comune [5]:

- sunt radiații care nu pot fi detectate de simțurile umane (auz, văz, miros etc.);

- se propagă în linie dreaptă cu viteza luminii și sunt supuse divergenței;
- nu pot fi deviate de câmpuri electrice sau magnetice;
- datorită lungimilor de undă foarte mici caracteristice acestor radiații, acestea sunt radiații de înaltă energie caracterizate de o mare putere de penetrare;
- capacitatea de penetrare a acestor radiații depinde de energia lor și de caracteristicile materialului străbătut (densitate, grosime, etc.);
- interacționează cu materia pe care o străbat, fiind atenuate, ionizând gazele, producând fluorescență și impresionând emulsiile fotosensibile;
- intensitatea radiațiilor este invers proporțională cu pătratul distanței față de sursa de radiații (în lipsa atenuării care are loc la trecerea acestora printr-un corp solid);
- sunt nocive pentru organisme vii provocând daune sau chiar distrugerea celulelor.

6.4 Producerea razelor X

Producerea razelor X se realizează în tuburi de raze X prin bombardarea unui anod de către un fascicol de electroni. Spectrul generat conține două componente importante: radiație X de frânare și radiație X caracteristică. Schema de principiu și imaginea unui tub de raze X sunt prezentate în figura 3. Principalele părți componente ale unui tub de raze x sunt : (i) sursa de electroni care este în general un filament de wolfram; (ii) sistemul de focalizare a electronilor care este în general un cilindru Wehnelt; (iii) anodul, care este o pastilă realizată dintr-un material pur (Cu, Co, Fe, Mo, W etc); (iv) circuitul de răcire cu apă [6].

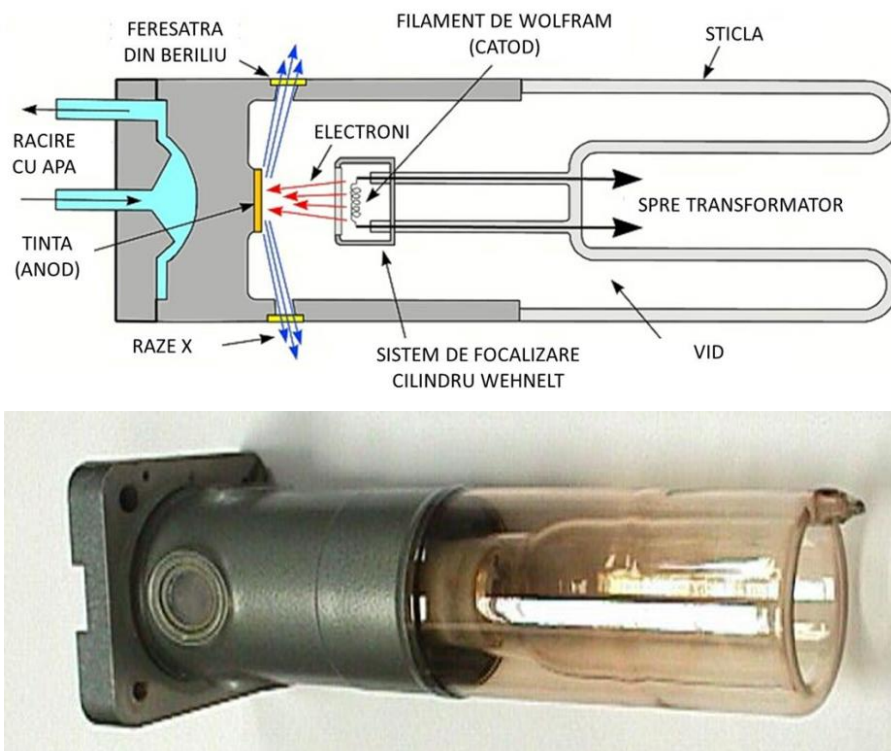


Figura 3. Schema de principiu și imaginea unui tub de raze X [7].

Trecerea curentului electric prin filamentul de wolfram va face ca acesta să emită electroni prin efect termoelectric. Aceștia vor fi focalizați de cilindrul Wehnelt și accelerați înspre anod la tensiuni de ordinul zecilor sau chiar sutelor de kV. Fascicolul de electroni accelerați va bombarda anodul (ținta), pierzându-și energia sub formă de căldură și raze X. Deoarece cea mai mare parte a energiei fascicolului de electroni ce bombardează anodul se transformă în căldură și doar o mică parte în raze X, tuburile de raze X trebuie să aibă un sistem de răcire foarte eficient. Așa cum am menționat mai sus, radiația X emisă în urma fenomenului de bombardare a anodului de către un fascicol de electroni, va conduce la generarea unui spectru de radiații X de frânare și a unui spectru de radiații X caracteristic [6].

Electronul care se deplasează în vecinătatea nucleului unui atom va fi frânat și i se va schimba direcția de deplasare datorită forței de atracție electrostatică. Devierea traiectoriei electronului și reducerea energiei sale cinetice conduc la emiterea unui foton. Lungimea de undă a fotonului se poate calcula cu formula :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{e \cdot V} \quad (3)$$

unde h este constanta lui Planck, c este viteza luminii, e este sarcina electronului, iar λ este lungimea de undă a fotonului emis. Lungimea de undă a radiației de frânare este independentă de materialul anodului, așa cum reiese din formula de mai sus. În general, sunt necesare mai multe astfel de fenomene pentru ca un electron din fascicolul de electroni emiși de filament să își piardă întreaga energie. Din această cauză, spectrul de frânare sau radiația albă este un spectru larg care conține toate lungimile de undă cuprinse între 0,5 Å și 2 Å [6].

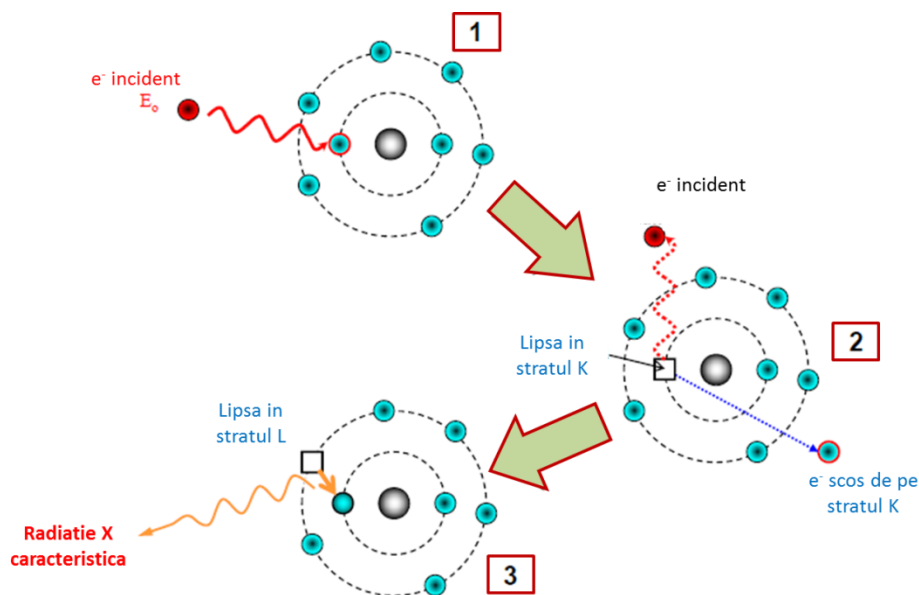


Figura 4. Mecanismul de producere a radiației X caracteristice.

Radiația X caracteristică este emisă atunci când un electron din fascicolul emis de filament are suficientă energie ca, atunci când ciocnește un atom din anod să îl ionizeze (figura 4). Electronul atinge energia suficientă pentru ionizarea unui atom din anod atunci când acesta

este accelerat la o diferență de potențial mai mare decât o valoare critică, caracteristică fiecărui material din care este realizat anodul. În momentul în care un electron este scos, de exemplu, din stratul K, (1) atomul este unul excitat. Din motive de minimizare a energiei, locul rămas liber în stratul K va fi ocupat de un electron din straturile superioare L, M, N etc. (2). Această tranziție este însoțită de emisia unui foton de energie egală cu diferența dintre energiile nivelelor între care are loc tranziția. Rezultă astfel liniile caracteristice din spectrul de raze X, linii care se suprapun peste spectrul de radiații X de frânare (radiație albă sau radiație continuă). Aceste linii alcătuiesc spectrul caracteristic, deoarece lungimea de undă a acestor linii este caracteristică materialului din care este făcut anodul. În cadrul experimentelor de difracție de raze X obișnuite pot fi observate următoarele lungimi de undă caracteristice: K_{α_1} , K_{α_2} și eventual K_{β} . Nu întotdeauna componentele α_1 și α_2 se vor observa distinct deoarece diferența între cele două lungimi de undă este foarte mică (figura 5).

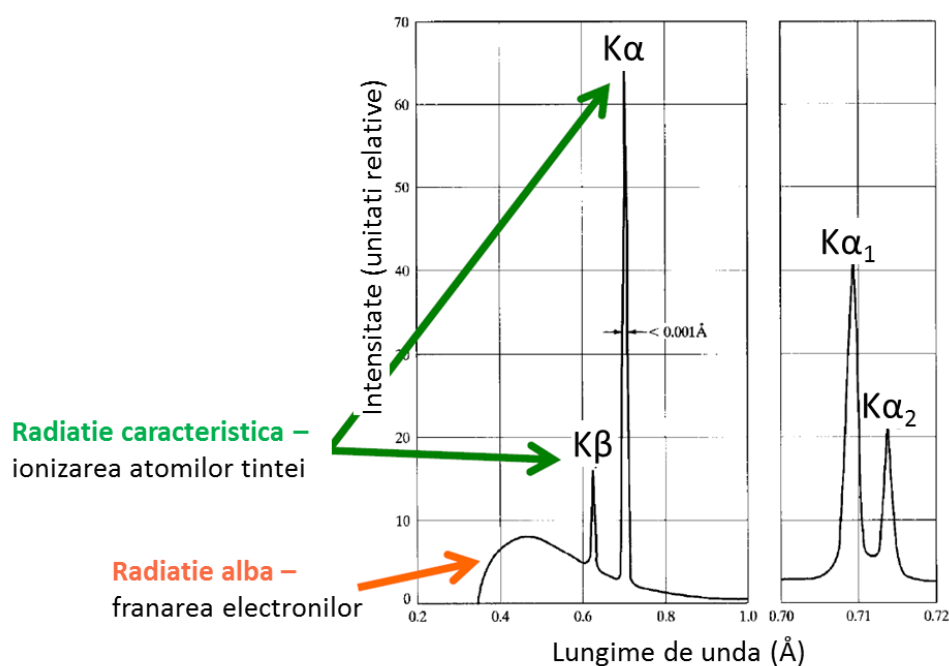


Figura 5. Radiația caracteristică și radiația de frânare produsă de un tub de raze X [8].

Spectrul de emisie a unui tub de raze X poate fi modificat prin modificarea curentului de filament și a tensiunii de accelerare. În figura 6 este prezentat modul în care influențează aceste două mărimi spectrul de emisie a unui tub de raze X, considerând că ținta este realizată din același material (Z este constant). Dacă tensiunea de accelerare este păstrată constant și curentul ce trece prin filament este crescut, va rezulta un spectru de radiații centrat pe o anumită lungime de undă. Intensitatea radiațiilor emise crește odată cu creșterea curentului ce trece prin filament, lungimea de undă a radiațiilor emise rămânând relativ aceeași. Creșterea intensității radiației este dată de creșterea numărului de electroni care ciocnesc ținta tubului de raze X. Dacă tensiunea de accelerare crește și curentul de filament este constant, va rezulta un spectru de intensitate crescândă iar lungimea de undă a radiațiilor emise va fi cu atât mai mică cu cât tensiunea de accelerare va fi mai mare. Acest lucru se datorează creșterii energiei electronilor emiși de filament, atunci când aceștia sunt accelerați într-o diferență de potențial din ce în ce

mai mare. Deplasarea spectrului de emisie înspre lungimi de undă mai mici semnifică emiterea unor radiații cu energie crescută și deci cu o capacitate de penetrare crescută [9].

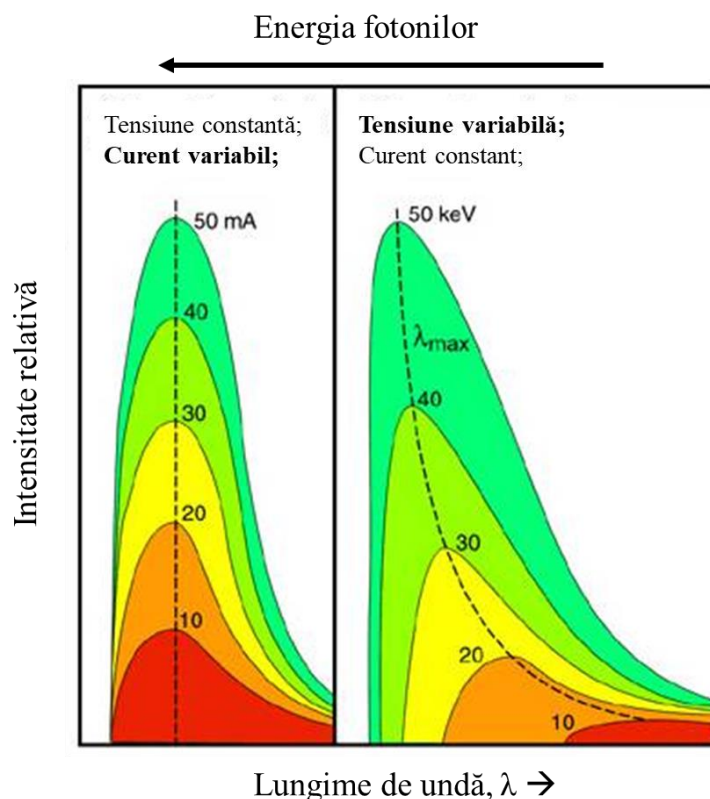


Figura 6. Influența curentului de filament și a tensiunii de accelerare asupra spectrului de emisie a unui tub de raze X [9].

În funcție de tensiunea de accelerare aplicată tubului de raze X, în tehnica controlului nedistructiv cu radiații X, s-au definit următoarele tipuri de raze (tabelul 1):

Tabelul 1. Duritatea radiațiilor X și grosimea de semiatenuare în oțel în funcție de tensiunea de accelerare a tubului de raze X [5].

Tipul radiației	Tensiunea de accelerare (kV)	Grosime de semiatenuare (mm)
Foarte moale	sub 20	-
Moale	20 – 60	-
Semi dură	60 – 150	0,5 – 2
Dură	150 – 400	2 – 7
Foarte dură	400 – 3000	7 – 20
Ultra dură	Peste 3000	> 20

Duritatea razelor X este o noțiune care sugerează capacitatea de penetrare a acestora. Cu cât radiațiile sunt mai dure cu atât capacitatea lor de penetrare a unui material este mai mare. Radiațiile caracterizate de lungime de undă mică se consideră a fi radiații dure și, deci, au penetrabilitate bună, în timp ce radiațiile caracterizate de lungime de undă mare sunt considerate radiații moi și au penetrabilitate scăzută [5].

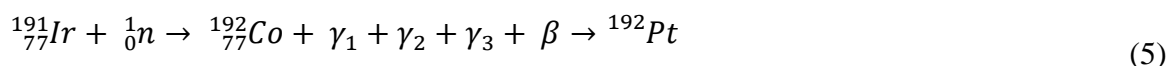
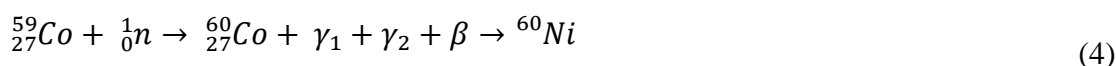
6.5 Generarea razelor gama

Radioactivitatea este proprietatea unor nuclee de a emite, în mod spontan (fără intervenția unor factori externi), radiații electromagnetice. Radiațiile sunt emise ca urmare a transformărilor radioactive care au loc în aceste nuclee sau prin procese de dezexcitare atomică sau nucleară. Sursele de radiații gama folosite în industrie sunt surse artificiale. Procesul de obținere a acestor surse se numește activare și se realizează prin bombardarea cu neutroni a nucleelor unor materiale stabile. Nucleele acestor materiale vor capta neutroni din fascicolul cu care este bombardat materialul, atomii astfel obținuți poartă denumirea de izotopi radioactivi și au proprietatea ca emit radiații gama. Principalele transformări și dezexcitări radioactive care au loc în interiorul nucleelor izotopilor radioactivi sunt [10]:

- Dezintegrarea α – în cadrul acestei dezintegrări, nucleul emite o particulă α care este de fapt un nucleu de heliu;
- Dezintegrarea β – în cadrul acestei dezintegrări nucleul emite o particula β care poate fi un electron sau un pozitron;
- Dezexcitarea γ – este o transformare în care nucleul aflat într-o stare excitată (stare energetică superioară) elimină surplusul de energie sub forma unui foton.

În cazul dezintegrărilor α și β , nucleul rămas are un alt număr atomic (Z) și deci aparține unei alte specii atomice. Emisia de radiații γ însoțește de obicei aceste procese de dezintegrare dar, deoarece fotonul nu are sarcină electrică sau masă de repaus, nucleul care emite aceste radiații nu își schimbă specia atomică.

Pentru exemplificarea celor menționate mai sus, să considerăm izotopul radioactiv ^{60}Co . Acesta suferă o dezintegrare β transformându-se într-un nucleu de nichel (^{60}Ni). Acest nucleu de nichel este într-o stare excitată, dezexcitarea acestuia are loc cu emisia a doi fotoni γ , un foton va avea energia de 1,17 MeV iar celălalt va avea energia de 1,33 MeV. După emiterea acestor doi fotoni, nucleul este unul stabil. Fenomenele de dezintegrare și dezexcitare pentru cele mai folosite tipuri de surse radioactive ^{60}Co și ^{192}Ir sunt prezentate în cele ce urmează:



Din acest exemplu se poate observa că o sursă radioactivă va emite fotoni gama cu una sau mai multe energii caracteristice structurii sale. Acest lucru face ca spectrul de radiații gama emise de o sursă să fie compus din linii discrete, spre deosebire de radiația de frânare produsă de un tub de raze X care este un spectru continuu. În figura 7 sunt prezentate spectrele de energie (liniile discrete) emise de izotopii de ^{60}Co , ^{192}Ir și ^{75}Se .

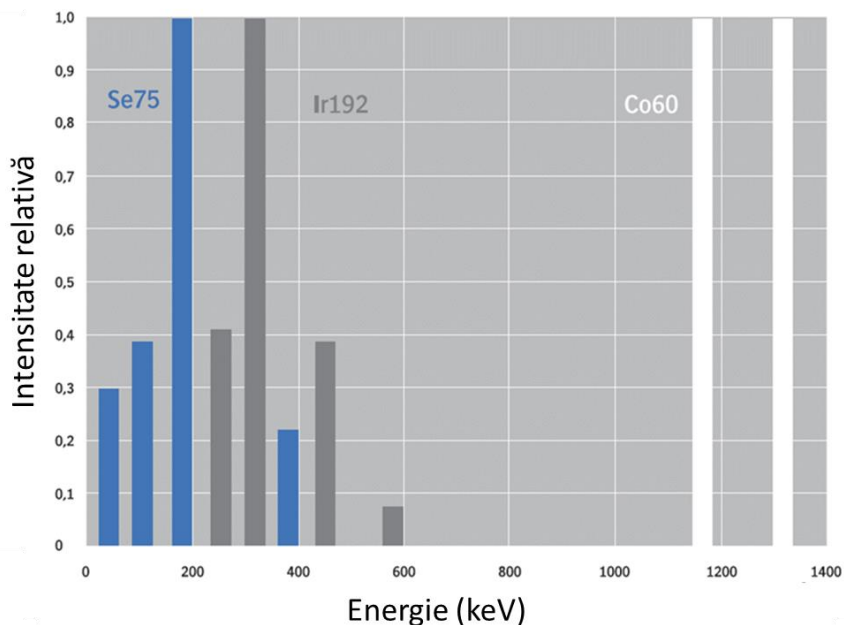


Figura 7. Spectrele de energie (liniile discrete) emise de izotopii de ⁶⁰Co, ¹⁹²Ir și ⁷⁵Se [11].

Trebuie menționat faptul că echipamentele care folosesc surse radioactive din izotopul ⁶⁰Co sunt caracterizate de energie mare și pot fi folosite la examinarea pieselor de oțel cu grosime de până la 200 mm. Echipamentele care folosesc ca sursă radioactivă izotopul ¹⁹²Ir sunt tot echipamente de înaltă energie, dar pot fi folosite la examinarea pieselor din oțel cu grosime cuprinsă între 10 și 100 mm.

O caracteristică importantă a surselor radioactive folosite în cadrul controlului nedistructiv cu radiații gama este timpul de înjumătățire. Având în vedere că sursele radioactive au dimensiuni de ordinul milimetrilor și că, în urma dezintegrărilor mai sus menționate nucleele devin stabile, este ușor de înțeles că, după o anumită perioadă de timp, intensitatea radiației emisă de o sursă radioactivă o să scadă, ca urmare a transformării din ce în ce mai multor izotopi radioactivi în nuclee stabile. Dacă la momentul inițial ($t = 0$) există N_0 nuclee radioactive, după un timp oarecare t , numărul de nuclee radioactive N este dat de relația următoare [10]:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \tag{6}$$

unde λ este constanta de dezintegrare radioactivă caracteristică fiecărei specii de nucleu radioactiv. Timpul de înjumătățire reprezintă durata de timp în care jumătate din nucleele radioactive ale sursei s-au transformat în nuclee stabile ($N = N_0/2$). Timpul de înjumătățire se poate estima cu relația [10]:

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \tag{7}$$

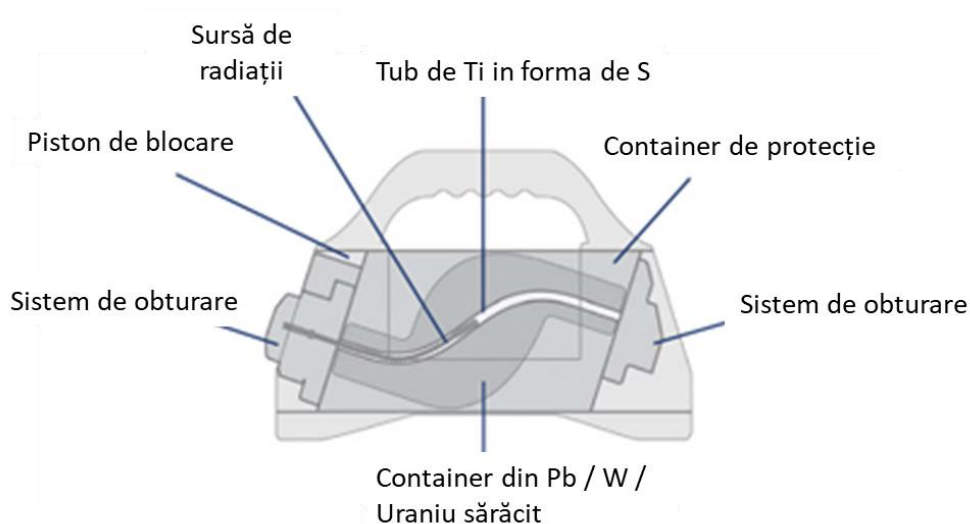
În tabelul 2 sunt prezentați timpii de înjumătățire a principalelor tipuri de surse radioactive folosite în cadrul controalelor nedistructive cu radiații gama.

Tabelul 2. Timpii de înjumătățire a principalelor surse de radiații gama [11].

Izotop radioactiv	Timp de înjumătățire
Tuliu 170	127 zile
Iridiu 192	70 zile
Cesiu 137	33 ani
Cobalt 60	5,3 ani

O altă caracteristică importantă a surselor de radiații gama este activitatea sursei, notată cu A . Activitatea sursei este dată de numărul de dezintegrări care au loc în unitatea de timp. Activitatea sursei se măsoară în Curie ($1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$ dezintegrări/s) iar, dacă activitatea sursei se raportează la unitatea de masă sau de volum, se obține activitatea specifică și se măsoară în Ci/g sau Ci/mm^3 .

În figura 8 este prezentată schița de principiu a unui container, în care este păstrată sursa radioactivă atunci când nu se fac examinări cu ea, iar în figura 9 este prezentat modul de manipulare a sursei radioactive în vederea realizării unui control nedistructiv.

**Figura 8.** Schița de principiu a containerului în care se află sursa radioactivă [12].

Sursa radioactivă se află într-un canal în formă de S în interiorul unui container de protecție realizat din Pb, W sau Uraniu sărăcit. Existența acestui container este necesară deoarece sursa de raze gama emite continuu radiații, nu numai atunci când este folosită pentru examinarea unui material. Materialele alese pentru realizarea containerului (Pb, W sau Uraniu sărăcit) au proprietatea ca absorb radiațiile emise de sursă, protejând astfel persoanele aflate în vecinătatea echipamentului [12]. Containerul de protecție, din motive evidente de securitate, este prevăzut cu un sistem de obturare basculant sau rotativ. Scoaterea sursei din container se realizează cu ajutorul unui cablu metalic flexibil, cablu cu ajutorul căruia sursa este deplasată până în capul de expunere, unde va rămâne pe toată durata expunerii (examinării). Capul de expunere poate avea diverse geometrii care permit geometrii de expunere diferite precum: frontală, monodirecțională, panoramică sau tridirecțională [5].

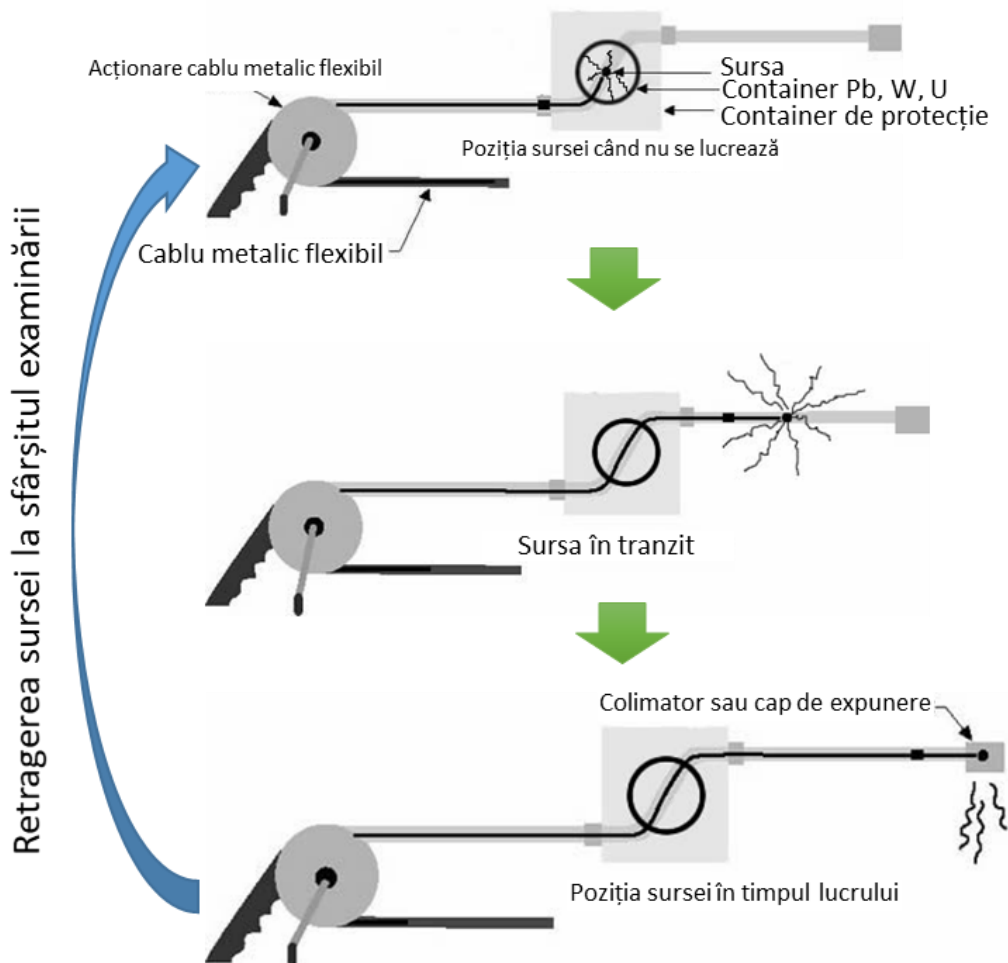


Figura 9. Modul de manipulare a sursei radioactive în vederea realizării unui control nedistructiv cu radiații gama [12].

Tubul flexibil prin care se deplasează sursa radioactivă din container până la capul de expunere este realizat din inele metalice cu inserție de cauciuc sau material plastic gama-absorbant, cu diametrul interior de 15 -20 mm. În momentul terminării unei expuneri, sursa este retrasă cu ajutorul aceluiași cablu în interiorul containerului de protecție.

6.6 Interacțiunea radiațiilor penetrante cu materia

Privind global trecerea unui fascicul de radiații penetrante (raze X sau gama) printr-o piesă (material supus examinării) se constată existența a trei tipuri de fotoni după cum urmează:

- **Fotoni transmiși (radiație transmisă)** – aceștia nu au interacționat cu atomii materialului investigat și direcția lor este neschimbată. Aceasta este radiația care poartă toată informația referitoare la probă și cu ajutorul ei se înregistrează radiografia probei.
- **Fotoni împrăștiați (radiație împrăștiată)** – aceștia sunt fotoni cu energie mai mică decât energia fotonilor din fasciculul incident și cu direcție schimbată. Radiația împrăștiată are un efect negativ asupra calității unei examinări prin aceea că micșorează claritatea și contrastul imaginii radiografice.

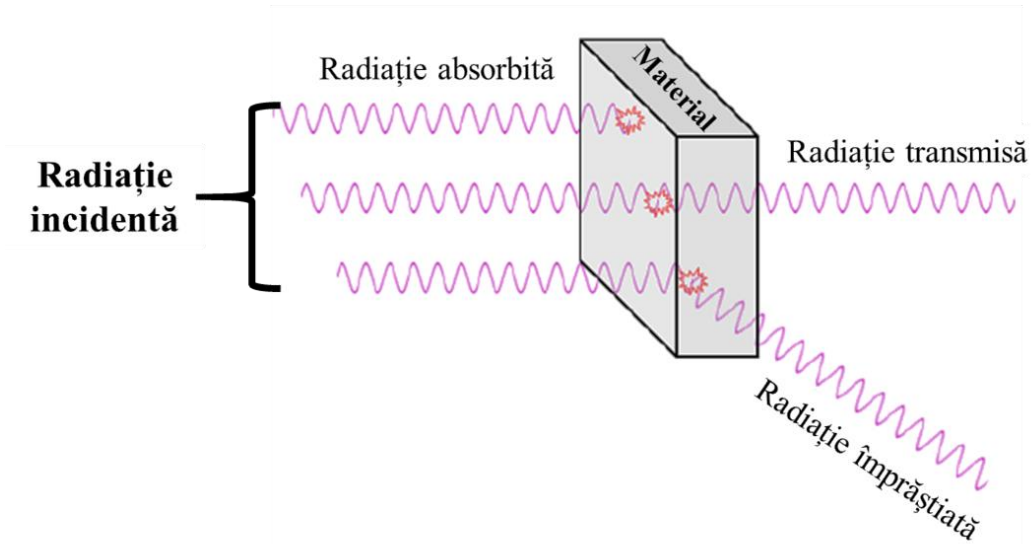
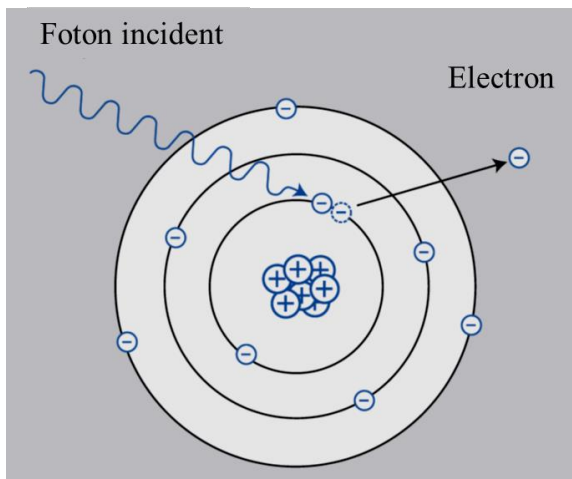
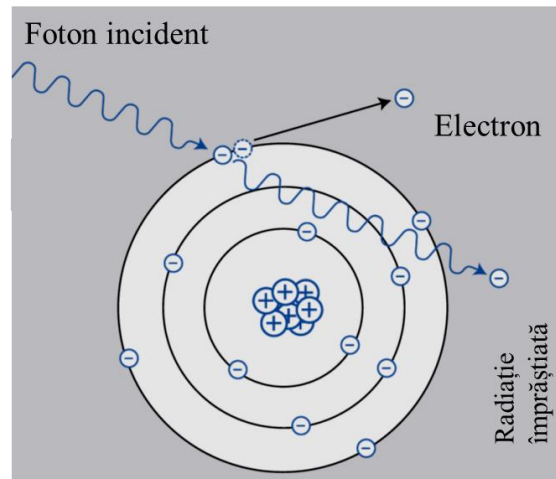


Figura 10. Interacțiunea globală a radiației penetrante cu materia.

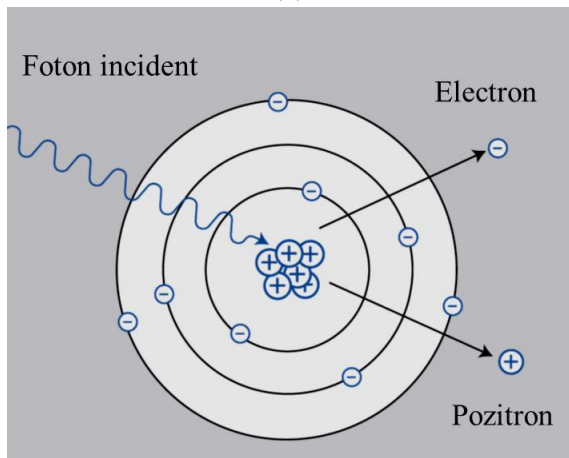
- **Fotoni absorbiți (radiație absorbită)** – acești fotoni au fost absorbiți de atomii materialului examinat și energia lor cinetică a fost convertită în altă formă de energie.



(a)



(b)



(c)

Figura 11. Interacțiunea radiației cu substanța la nivel elementar. (a) efectul fotoelectric, (b) efectul Compton, (c) formarea de perechi [11].

Din punct de vedere al relevanței pentru controlul nedistructiv cu radiații penetrante, următoarele trei tipuri de interacțiuni sunt cele mai importante pentru explicarea fenomenului de absorbție a radiațiilor penetrante [11]:

- *Efectul fotoelectric* – constă în interacțiunea dintre un foton al radiației penetrante cu energie relativ scăzută, cu un electron aparținând unui atom din materialul examinat. În urma acestei interacțiuni foton-electron, întreaga energie a fotonului este consumată pentru smulgerea electronului din atom. Electronul devenit liber își continuă drumul prin material dând naștere la fenomene secundare de ionizare sau excitare.
- *Efectul Compton* – constă tot din interacțiunea dintre un foton și un electron, electronul fiind de această dată de pe un strat exterior al atomului. În acest caz, o parte din energia cinetică a fotonului va fi folosită pentru scoaterea electronului din atom. Rezultatul acestui tip de interacțiune va fi un foton de energie mai mică și deviat de la traiectoria lui inițială și un electron liber. Atât fotonul cât și electronul secundar pot da naștere ulterior la fenomene secundare.
- *Formarea de perechi* – care constă în absorbția fotonului de către nucleul unui atom și formarea unei perechi electron-pozitron care traversează substanța. Acest tip de interacțiune este posibilă doar dacă energia fotonului incident este mai mare decât 1,022 MeV. După formarea perechii, pozitronul poate fi anihilat cu un alt electron, dând naștere la doi fotoni de câte 0,5 MeV, care, fiecare la rândul său, continuă lanțul de interacțiuni cu atomii materialului străbătut.

Atât fenomenul de absorbție cât și fenomenul de împrăștiere conduc la atenuarea intensității fascicolului. La traversarea unui material, intensitatea radiației variază după o lege exponențială, în funcție de grosimea materialului și coeficientul de atenuare liniară conform relației de mai jos:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (8)$$

unde I reprezintă intensitatea radiației după trecerea printr-un material de grosime x , I_0 reprezintă intensitatea fascicolului inițial iar μ este coeficientul de atenuare liniară. Coeficientul de atenuare liniară este o funcție ce depinde de lungimea de undă a radiației incidente, de numărul atomic Z al atomilor din materialul examinat și de densitatea materialului conform relației:

$$\mu = K \cdot \lambda^3 \cdot Z^3 \quad (9)$$

unde μ este coeficient de atenuare liniară, λ este lungimea de undă a radiației incidente, Z este numărul atomic al atomilor care alcătuiesc materialul supus examinării și K este un factor corelat cu densitatea materialului.

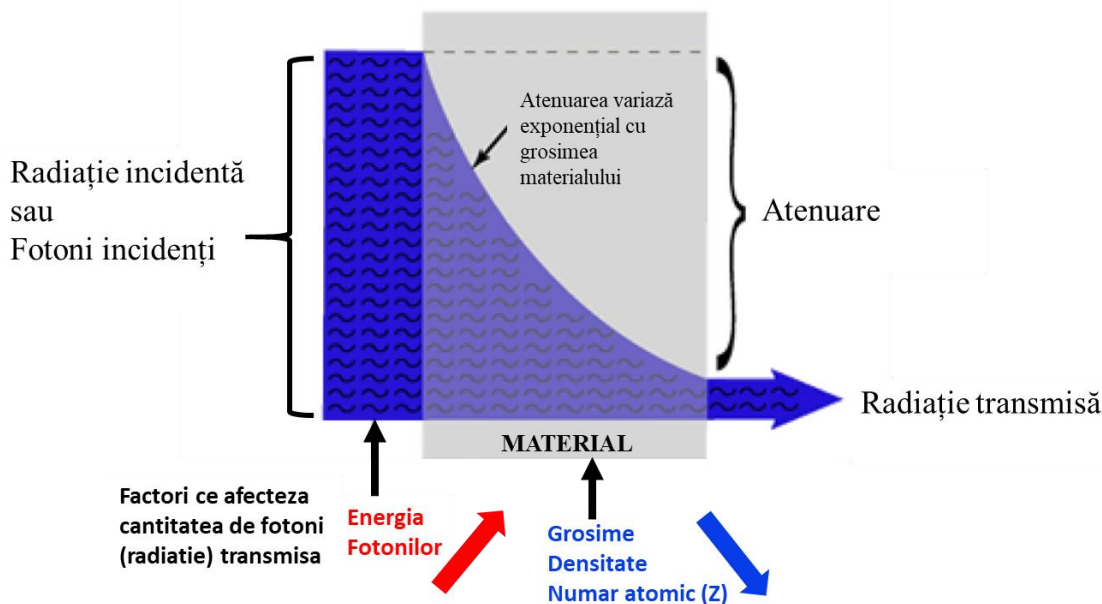


Figura 12. Influența caracteristicilor materialului și a energiei radiației incidente asupra fenomenului de atenuare a fascicolului de radiații penetrante [3].

Așa cum se poate observa și în figura 12, fenomenul de atenuare este dependent de natura materialului străbătut și de energia radiațiilor incidente. Cu cât grosimea, densitatea și numărul atomic Z sunt mai mari, cu atât fenomenul de atenuare va fi mai pronunțat, respectiv cu cât lungimea de undă a radiațiilor penetrante va fi mai mică (energie mai mare) cu atât fenomenul de atenuare va fi mai mic. Din relația care dă variația intensității unui fascicul de radiații, se poate deduce grosimea de material care atenuează intensitatea unui fascicul la jumătate din intensitatea fascicolului incident. Această grosime de material este denumită grosime de semiatenuare (abreviere HVT – Half Value Thickness) și se poate calcula cu relația:

$$d_{\frac{1}{2}} = \frac{0,693}{\mu} \quad (10)$$

Și acest parametru este dependent de energia fotonilor din fasciculul de radiații penetrante și de caracteristicile materialului. Pentru un material anume, cu cât energia fotonilor din fasciculul de radiații penetrante este mai mare, cu atât grosimea de semiatenuare va fi mai mare și invers. În același timp, grosimea de semiatenuare variază invers proporțional cu coeficientul de atenuare liniară (μ), cu cât acest coeficient o să fie mai mare cu atât grosimea de semiatenuare va fi mai mică și invers. În figura 13 este prezentată variația intensității unui fascicul de radiații penetrante, în funcție de grosimea materialului străbătut.

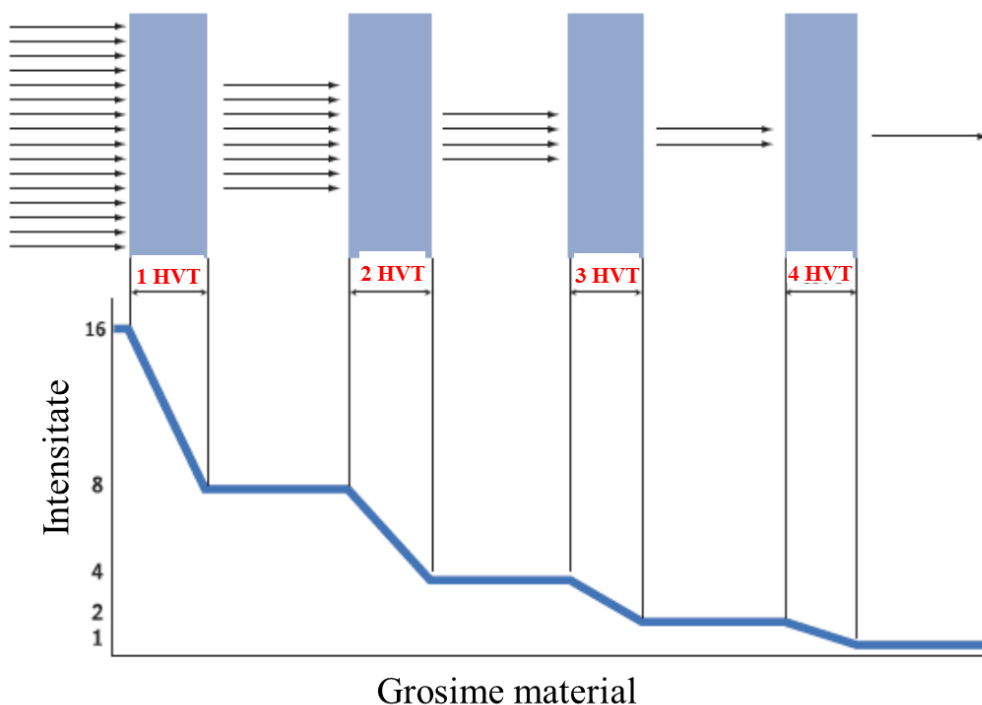


Figura 13. Variația intensității unui fascicul de radiații penetrante în funcție de grosimea materialului străbătut. Definiția grosimii de semiatenuare (HVT) [11].

În tabele 3 și 4 sunt date valorile grosimilor de semiatenuare pentru cazul utilizării radiațiilor X, în funcție de tensiunea de accelerare, și pentru radiații gama folosind ca sursă de radiații izotopii cobaltului și iridiului.

Tabelul 3. Grosimea de semiatenuare a radiațiilor X în plumb și beton în funcție de tensiunea de accelerare [3].

Raze X	Grosimea de semiatenuare (mm)	
Tensiune de accelerare (kV)	Plumb	Beton
50	0.06	4.32
100	0.27	15.10
150	0.30	22.32
200	0.52	25.0
250	0.88	28.0
300	1.47	31.21
400	2.5	33.0
1000	7.9	44.45

Tabelul 4. Grosimea de semiatenuare a radiațiilor gama în diverse materiale în funcție de tipul sursei radioactive (izotopi radioactivi de cobalt sau iridiu) [3].

Raze γ	Grosimea de semiatenuare (mm)				
Sursă	Beton	Oțel	Plumb	Wolfram	Uraniu
Iridiu-192	44.5	12.7	4.8	3.3	2.8
Cobalt-60	60.5	21.6	12.5	7.9	6.9

În afară de atenuarea datorită trecerii fascicolului de radiații penetrante prin material, mai trebuie să luăm în calcul și atenuarea indusă de distanță (figura 14). Chiar dacă fascicolul de radiații penetrante nu întâlnește nici un material, intensitatea acestuia se va reduce datorită caracterului divergent al fascicolului. Pe măsură ce distanța dintre sursă și un anumit plan perpendicular pe axa longitudinală a fascicolului crește, același număr de fotoni vor fi incidenți pe o suprafață din ce în ce mai mare. După cum se vede și în figura 14, suprafața „iluminată” de fascicul crește cu pătratul distanței față de sursa de radiații. Ca urmare, numărul de fotoni care cad pe aceeași arie (se poate considera suprafața unui film radiografic) scade cu pătratul distanței față de sursa de radiații, conform relației de mai jos:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (11)$$

unde I_1 este intensitatea fascicolului la distanța d_1 față de sursă și I_2 este intensitatea fascicolului la distanța d_2 față de sursă. Pentru o examinare de bună calitate trebuie să se țină seama atât de atenuarea produsă material cât și de atenuarea prin distanță.

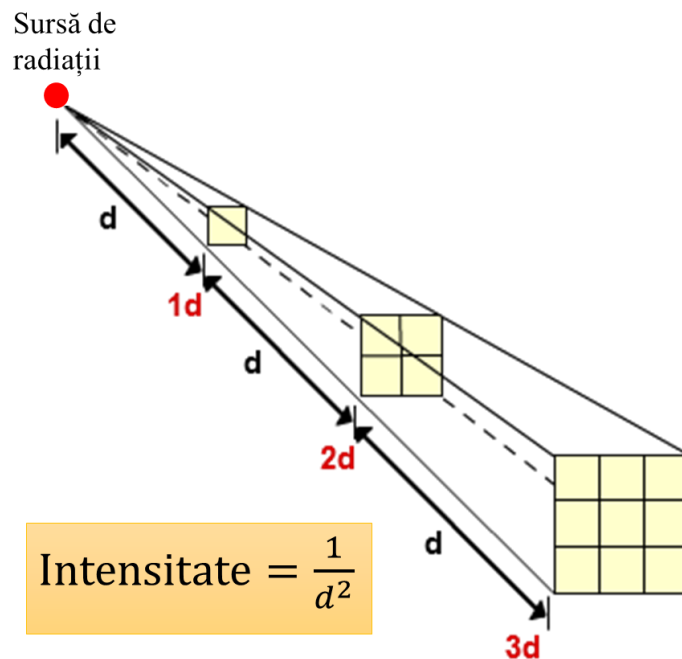


Figura 14. Atenuarea intensității unui fascicul de radiații în funcție de distanța față de sursă [12].

În funcție de tensiunea de accelerare respectiv de duritatea radiației se poate determina adâncimea de penetrare a acesteia. În figura 15 este prezentat un grafic în care este exemplificat efectul tensiunii de accelerare asupra adâncimii de penetrare în cupru, fier, titan și aluminiu. Se poate observa că, dacă tensiunea de accelerare crește, indiferent de tipul materialului, adâncimea de penetrare crește. În același timp, se poate observa că pentru o anumită tensiune de accelerare adâncimea de penetrare este diferită în funcție de material.

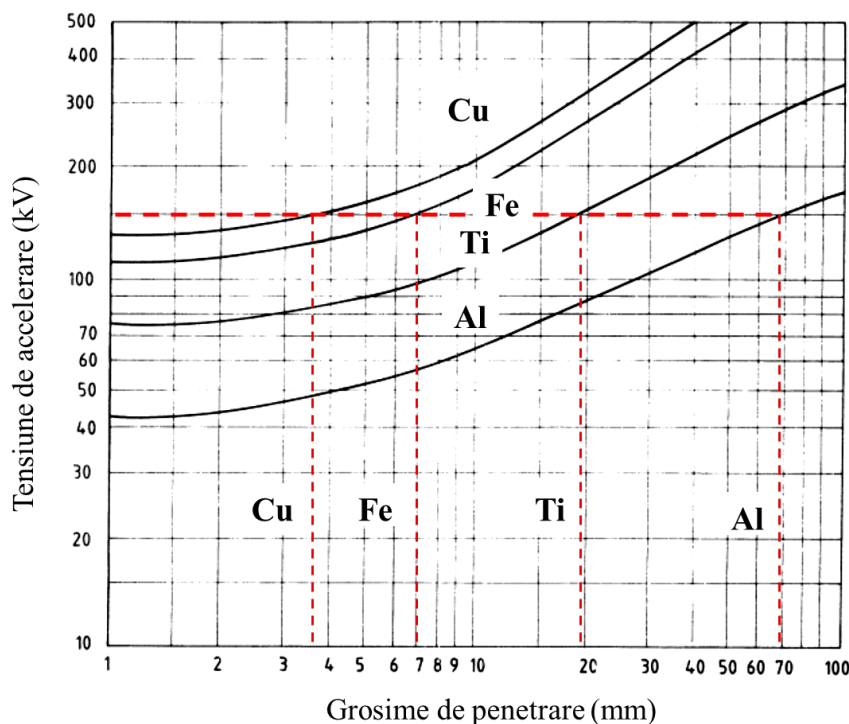


Figura 15. Tensiunea de accelerare necesară pentru penetrarea anumitor grosimi de cupru, fier, titan și aluminiu [10].

Să considerăm tensiunea de accelerare de 150 kV, observăm că adâncimea de penetrare în cupru este de aproximativ 3,5 mm, în fier este de aproximativ 7 mm, în titan este de aproximativ 20 mm iar în aluminiu este de 70 mm. Așadar, adâncimea de penetrare depinde și de caracteristicile materialului nu numai de duritatea radiației. Cu cât densitatea materialului va fi mai mare (respectiv cu cât numărul atomic Z va fi mai mare) cu atât adâncimea de penetrare va fi mai mică și invers.

6.7 Interacțiunea radiației cu filmul radiografic

În figura 16 este prezentată, în secțiune, structura unui film radiografic. Filmul radiografic este alcătuit dintr-un suport polimeric (polietilenă tereftalată), de grosime aproximativă 170 – 200 μm , pe suprafața căruia este depus un strat de emulsie fotosensibilă. Aceasta este formată dintr-o matrice gelatinoasă organică (transparentă pentru raze X), în care sunt imersate particule de halogenură de Argint (cel mai adesea AgBr). Aderența emulsiei fotosensibile la suportul polimeric se realizează prin intermediul unui strat de aderență.

Grosimea stratului gelatinos este de obicei de aproximativ 5 – 10 μm [10, 11]. În general, ambele fețe ale filmului sunt acoperite cu această emulsie fotosensibilă (pentru reținerea unei cantități cât mai mari de radiații), dar există și filme radiografice la care doar o parte a filmului este acoperită cu emulsie fotosensibilă. Stratul de emulsie fotosensibilă este acoperit cu un strat de protecție, așa cum se poate observa în figura 16. În cazul filmelor radiografice cu un singur strat fotosensibil, cealaltă suprafață este acoperită cu un strat antireflexie. Acesta trebuie să împiedice interacțiunea radiațiilor reflectate de suprafața inferioară a filmului, sau a radiațiilor care au trecut prin film și care ar putea fi reflectate de alte suprafețe cu emulsia fotosensibilă.

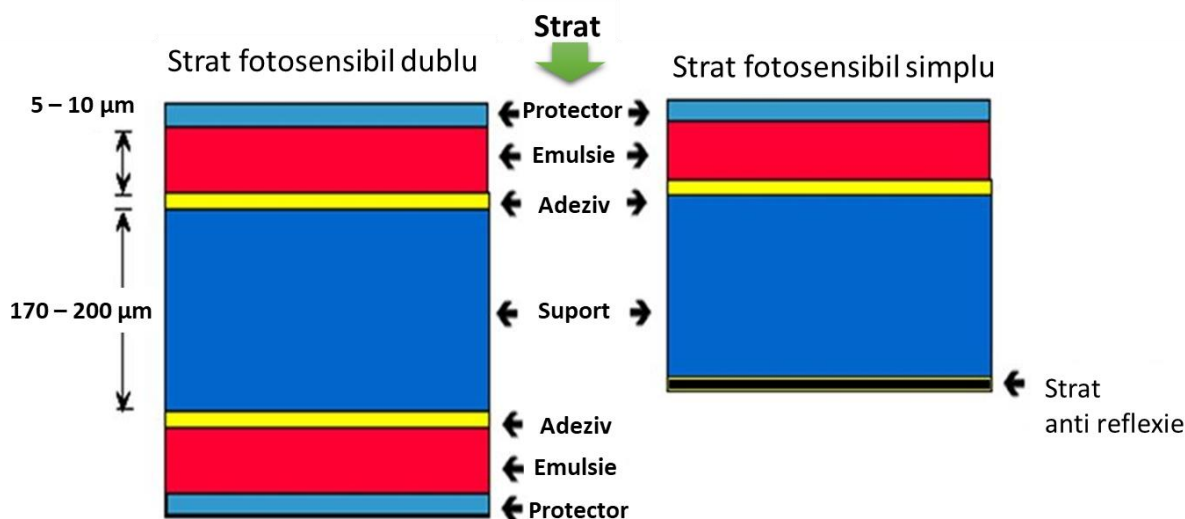


Figura 16. Secțiune prin structura unui film radiografic cu strat fotosensibil dublu sau simplu.

Absorbția radiației de către particulele de AgBr conduce la descompunerea acestora și formarea imaginii latente. Imaginea latentă corespunde imaginii radiante, adică distribuției spațiale a intensității fascicolului după trecerea prin piesa examinată.

După expunere urmează etapa de dezvoltare. Prima etapă a dezvoltării este relevarea. În această etapă, argintul rezultat din descompunerea moleculelor de bromura de argint (prin absorbția radiațiilor) se constituie în particule negre și vizibile. În acest fel, imaginea latentă se transformă în imagine vizibilă numită imagine radiografică [13]. Următoarea etapă este fixarea, aceasta constând în îndepărtarea tuturor moleculelor de bromură de argint nedescompuse. În acest fel, filmul radiografic nu mai este sensibil la radiații externe.

Alegerea filmului radiografic, ce urmează a fi folosit, se realizează pe baza unor criterii, cele mai importante fiind menționate în cele ce urmează [5]:

- compoziția chimică, forma și dimensiunile piesei de examinat;
- tipul radiației penetrante folosite (raze X sau raze gama);
- tensiunea de accelerare la care poate funcționa tubul de raze X existent sau intensitatea radiațiilor gama;
- cerințele impuse controlului (este important să obținem o radiografie de calitate sau este necesar doar un control de rutină rapid și ieftin).

6.8 Factorii care influențează calitatea unui control cu radiații penetrante

Obiectivul general al examinării cu radiații penetrante este acela de a obține o imagine care să conțină o cantitate cât mai mare posibilă de informații despre proba examinată. Acest lucru se obține prin realizarea unor imagini radiografice de bună calitate. O calitate bună a imaginii radiografice (sensibilitate ridicată) se poate obține doar cunoscând factorii care o influențează. În acest sens, în figura 17 sunt prezentați factorii care influențează imaginea radiografică, iar în cele ce urmează se va face o prezentare succintă a acestora.

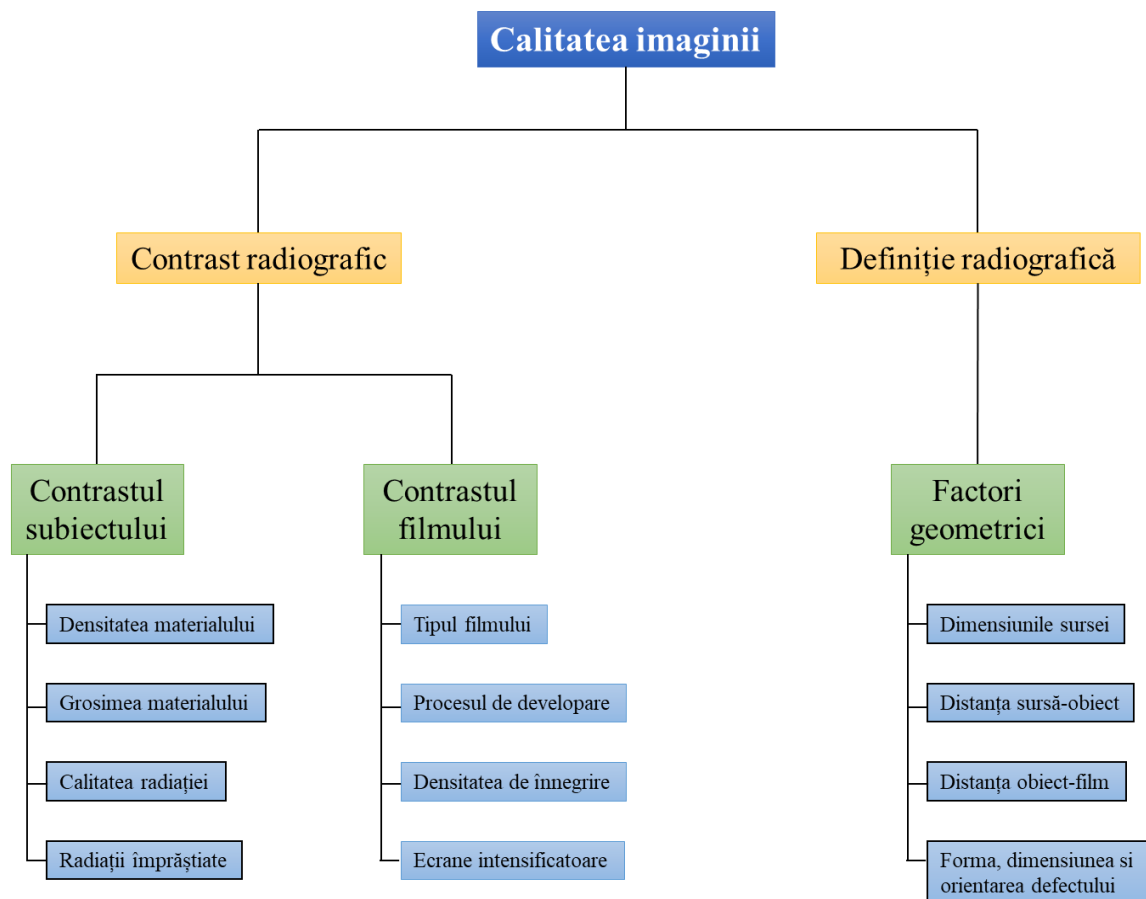


Figura 17. Factorii care influențează calitatea unei imagini radiografice [adaptată după 13].

Din figura 17 se poate observa că imaginea radiografică poate fi caracterizată calitativ de contrastul radiografic și de definiția radiografică.

Contrastul radiografic se definește ca raportul dintre strălucirea a două suprafețe adiacente ale unei radiografii. Strălucirea diferită a două suprafețe adiacente rezultă ca urmare a unei variații de grosime a piesei sau prezența unor goluri sau zone poroase în probă. Cu cât diferența de înnegrire a filmului corespunzătoare celor două suprafețe adiacente este mai mare, cu atât contrastul radiografic este mai mare. Cu cât contrastul este mai mare cu atât capacitatea de punere în evidență a unor defecte este mai mare. În figura 18 este exemplificată schematic diferența dintre o imagine radiografică cu contrast crescut și o imagine radiografică cu contrast scăzut pentru o piesă în trepte (cu variații de grosime). În cazul imaginii radiografice cu contrast ridicat se observă (figura 18a) o diferență semnificativă de înnegrire a filmului corespunzătoare

celor două grosimi ale materialului în timp ce în cazul imaginii cu contrast radiografic scăzut diferența de înnegrire nu este atât de mare. În ambele imagini radiografice există un punct negru (în partea dreaptă) caracterizat de aceeași înnegrire a filmului radiografic, simulând prezenta unui defect în material (fisura, porozitate, gaura, etc). Se poate remarca ușurința cu care acest punct este detectabil în imaginea radiografică cu contrast crescut, în comparație cu imaginea radiografică cu contrast scăzut.

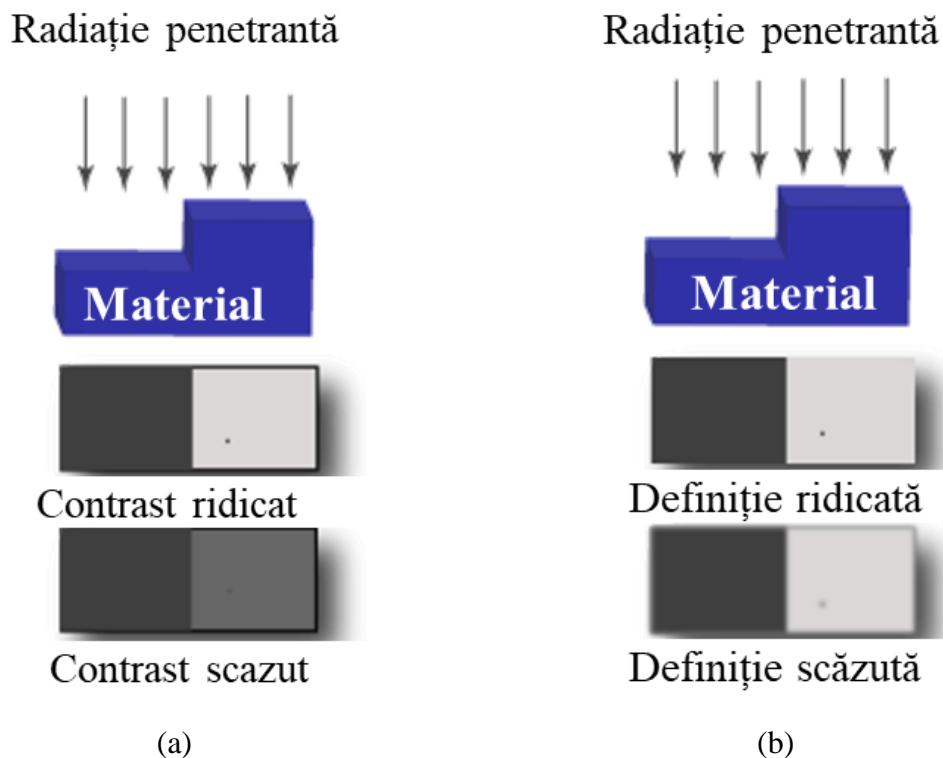


Figura 18. Reprezentarea schematică a contrastului radiografic (a) și a definiției radiografice (b) pentru o piesă în trepte [12].

Definiția radiografică reprezintă mărimea zonei de trecere între două suprafețe adiacente ale unei radiografii, caracterizate de densități de înnegrire a filmului diferite. În figura 18b este prezentată diferența între o imagine radiografică de înaltă definiție și una cu definiție scăzută, pentru o piesă metalică în trepte. Se observă că, în cazul radiografiei cu definiție ridicată, trecerea între cele două zone cu densitate diferită de înnegrire a filmului se face abrupt, în timp ce în cazul radiografiei cu definiție scăzută trecerea se realizează gradual, sub forma unei zone blurate. Imaginea cu definiție ridicată reprezintă o reproducere fidelă a variației grosimii piesei, în timp ce imaginii cu definiție scăzută nu i se mai poate atribui această calitate. Și în acest caz, imaginea punctului din dreapta jos este mult mai ușor de observat pe imaginea cu definiție ridicată în comparație cu imaginea cu definiție scăzută.

6.8.1 Contrastul subiectului

În această categorie de factori intră densitatea materialului, grosimea materialului, calitatea radiației și radiațiile împrăștiate. Influența densității și a grosimii materialului au fost

anterior discutate motiv pentru care menționăm doar că, dacă densitatea materialului examinat este mare, contrastul radiografic va fi mare și invers. Acest lucru se explică printr-o atenuare semnificativă a radiațiilor de către material în timp ce prezența unui defect, de tip suflură de exemplu, va conduce la o atenuare mult mai redusă a radiațiilor și deci la observarea facilă a defectului. Experimental s-a demonstrat că, dacă grosimea materialului examinat este mare, contrastul radiografic obținut este mic și invers, acest lucru fiind explicat tot pe baza atenuării fascicolului de radiații penetrante. Valoarea coeficientului de atenuare liniară (μ) este constantă pentru grosimi de material mici, dar prezintă o scădere cu creșterea grosimii materialului. De exemplu, coeficientul de atenuare liniară pentru oțel cu grosimea de 5 mm este de $0,9 \text{ cm}^{-1}$, în timp ce pentru același oțel dar cu grosimea de 60 mm coeficientul de atenuare liniară are valoarea de $0,6 \text{ cm}^{-1}$ [13].

Calitatea radiației se referă la duritatea acesteia. Dacă se folosesc radiații cu duritate mare (energie mare/lungime de undă mică) contrastul obținut va fi mic și invers. La o primă vedere reiese necesitatea folosirii radiațiilor moi în vederea obținerii unui contrast optim. Totuși, trebuie ținut cont de faptul că radiațiile moi sunt puternic atenuate de materiale și există riscul să nu se obțină pe film o densitate de înregistrare suficientă și, deci, contrastul să fie scăzut. În cazul pieselor cu grosime mare este necesară utilizarea unor radiații dure, care să poată penetra grosimea materialului, cu toate că aceasta va duce la scăderea contrastului.

Tabelul 5. Mărimea defectului minim detectabil în funcție de calitatea radiației și de material [13].

Sursă de radiații	Energia medie a radiației (MeV)	Mărimea defectului minim detectabil (mm)		
		Oțel	Cupru	Aluminiu
Ir 192	0,45	0,27	0,25	0,81
Cs 137	0,66	0,31	0,31	0,99
Co 60	1,25	0,45	0,44	1,41

În tabelul 5 sunt date valorile minime ale defectului detectabil pentru oțel, cupru și aluminiu având aceeași grosime (60 mm), examinate cu radiații gama provenite de la surse de radiații de energie diferită. Se poate observa că mărimea defectului minim detectabil crește cu creșterea energiei radiației penetrante dar și cu creșterea densității materialului examinat. Din aceste observații putem trage următoarea concluzie: contrastul radiografic scade odată cu creșterea densității materialului, și pentru același material contrastul scade odată cu creșterea energiei (durității) radiației penetrante.

6.8.2 Radiația împrăștiată

Foarte adesea radiația împrăștiată (denumită și radiație secundară) trebuie luată în calcul atunci când se realizează o examinare cu radiații penetrante. Radiațiile din fascicolul incident pot fi împrăștiate în urma interacțiunii cu materialul examinat, în urma interacțiunii cu obiecte aflate în vecinătatea piesei examinate sau chiar masa (pardoseala) pe care se află obiectul supus investigației. Acest tip de radiație este cunoscut și sub denumirea de radiație retroîmprăștiată.

Radiația împrăștiată reduce contrastul imaginii radiografice deoarece se obține o imagine cu aspect de voal peste imaginea piesei.

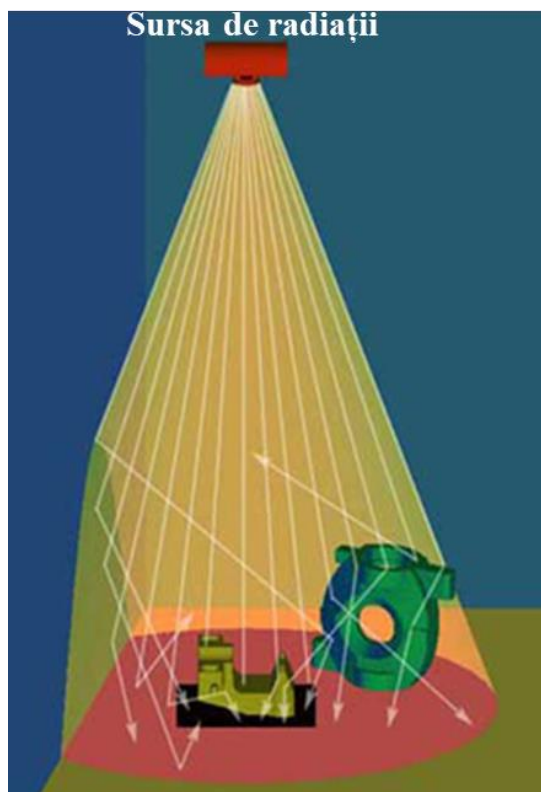


Figura 19. Formarea radiațiilor împrăștiate în cadrul controlului cu radiații penetrante [12].

De asemenea, cu cât divergența fascicolului incident este mai mare, cu atât se formează mai multe radiații împrăștiate și, deci, se reduce contrastul imaginii. Reducerea efectului radiației împrăștiate se realizează prin îndepărtarea obiectelor din apropierea piesei examinate, sau utilizarea unor materiale absorbante (măști), care să limiteze aria suprafeței iradiate. Reducerea efectului radiației retroîmprăștiate se realizează cu ajutorul ecranelor de protecție din plumb situate în caseta filmului. În practica industrială se plasează un ecran de plumb având grosimea de 0,125 mm în fața filmului fotografic și un alt ecran de plumb cu grosimea de 0,254 mm în spatele filmului.

6.8.3 Contrastul filmului

Contrastul filmului este definit ca raportul dintre creșterea densităților de înnegrire și creșterea logaritmului expunerii care o provoacă, într-un punct dat de pe curba caracteristică (curba de înnegrire a filmului). Prin expunere se înțelege cantitatea totală de radiații care străbate proba și filmul radiografic (I_0) pe toată durata iradierii (t).

$$E = I_0 \cdot t \quad (12)$$

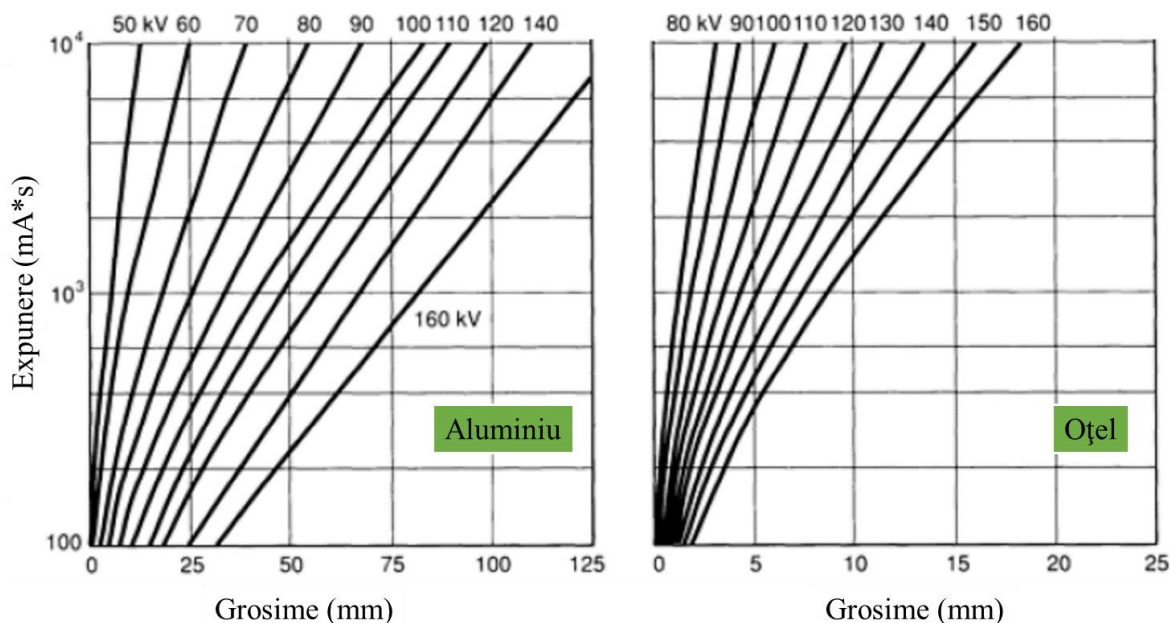


Figura 20. Determinarea timpului de expunere pentru piese din aluminiu și oțel cu ajutorul curbelor experimentale [14].

Pentru alegerea diagramei folosite la determinarea timpului de expunere trebuie ținut cont că acestea se întocmesc folosind anumiți parametri precum: tipul generatorului de radiații penetrante, densitatea filmului, folosirea sau nu a unor ecrane intensificatoare, distanța sursă-film radiografic, tipul de film, parametrii procesului de dezvoltare a filmului, etc.

6.8.4 Tipul filmului radiografic

Tipul filmului radiografic este definit prin: rapiditate, granulație și contrast. Rapiditatea filmului reprezintă inversul expunerii necesare pentru a obține o densitate arbitrar aleasă, sau viteza de formare a imaginii latente la iradierea în condițiile date. Granulația filmului este reprezentată de dimensiunea medie a aglomeratelor de cristale de halogenură de argint din emulsia fotosensibilă. Există o legătură strânsă între granulația filmului și rapiditatea acestuia. Cu cât granulația este mai mare, cu atât filmul este mai rapid și invers.

Filmele radiografice sunt clasificate în 6 clase de calitate, de la C1 la C6, conform EN ISO 11699-1 [15]. Filmele din clasa C1 sunt filmele de cea mai înaltă calitate având cea mai înaltă granulație. Acestea au dezavantajul că necesită timp de expunere mare (ceea ce înseamnă productivitate scăzută) dar și radiații de energie mare (tensiuni de accelerare foarte mari în cazul tuburilor de raze X sau surse radioactive pentru radiații gama). Aceste filme se utilizează pentru aplicații speciale, de exemplu în microelectronică, unde este nevoie de rezoluție înaltă. Filmele din categoria C2 și C3 se utilizează cu precădere în industria nucleară și industria aerospațială. Filmele din categoriile C4 și C5 sunt folosite pentru controlul pieselor de uz general, a îmbinărilor sudate sau a pieselor obținute prin turnare. Filmele din categoria C6 sunt utilizate pentru examinarea construcțiilor sau a structurilor masive metalice sau nemetalice (structuri din beton) [15].

6.8.5 Procesul de dezvoltare a filmului radiografic

Curba caracteristică a unui film nu este influențată doar de caracteristicile substanței fotosensibile de pe suprafața lui, ci și de procesul de dezvoltare. Reușita unui proces de dezvoltare depinde de următorii factori: durata de dezvoltare, temperatură, concentrația băii de dezvoltare și eventuala agitație a filmului în baia de dezvoltare. În general, se recomandă urmarea întocmai a prescripțiilor de dezvoltare furnizate de producătorul filmului radiografic. Referitor la timpul de dezvoltare, în absența unei indicații specifice, se recomandă o durată de dezvoltare de 5 minute [16]. Pentru durate mai mici de dezvoltare se obține un contrast scăzut al imaginii iar pentru durate mai mari de dezvoltare se formează un voal (ceață) peste imaginea radiografică, care are ca efect scăderea contrastului imaginii. Așadar, orice deviație de la condițiile optime de dezvoltare va conduce la o diminuare a calității imaginii radiografice.

6.8.6 Densitatea de înnegrire

În cazul unui film oarecare, raportul dintre diferitele expuneri și înnegririle pe care le creează pe film formează o curbă denumită curbă caracteristică de înnegrire. Această curbă se reprezintă folosind pe abscisă valorile logaritmice ale expunerii ($\log E$) iar pe ordonată densitățile filmului D măsurate cu un densitometru (figura 21a). Aceste curbe se trasează pe baza mai multor experimente în care filmul este supus diferitelor expuneri (doze de radiații) și măsurarea densității filmelor. Fiecare experiment reprezintă un punct experimental iar prin unirea tuturor punctelor experimentale rezultă curba caracteristică a filmului. Densitatea unui film reprezintă logaritmul zecimal al raportului între intensitatea luminii incidente (I_0) și intensitatea luminii transmise (I) într-un punct al radiografiei [5].

$$D = \log \frac{I_0}{I} \quad (13)$$

În figura 21 este prezentată o curbă caracteristică teoretică pentru un film radiografic. Analizând forma curbei caracteristice, se poate observa că, atunci când pe suprafața filmului ajunge un număr mic de fotoni (ceea ce înseamnă densitate mică a filmului), panta curbei este mică. În aceste condiții, sensibilitatea filmului este redusă. De exemplu, se poate observa că, dacă creștem logaritmul expunerii de la valoarea 0,75 la 1,4, densitatea filmului se modifică puțin respectiv de la 0,2 la 0,3 (cazul „a” din figura 21). Panta curbei caracteristice a filmului considerat (și pentru majoritatea filmelor radiografice) atinge valoarea maximă pentru densități de înnegrire mai mari decât 2. În această regiune a curbei, o ușoară creștere a logaritmului expunerii va conduce la creșteri semnificative ale densității filmului. De exemplu, dacă logaritmul expunerii crește de la 2,4 la 2,6, densitatea de înnegrire a filmului crește de la 1,75 la 2,75 (cazul „b” din figura 21). În această zonă sensibilitatea filmului este maximă.

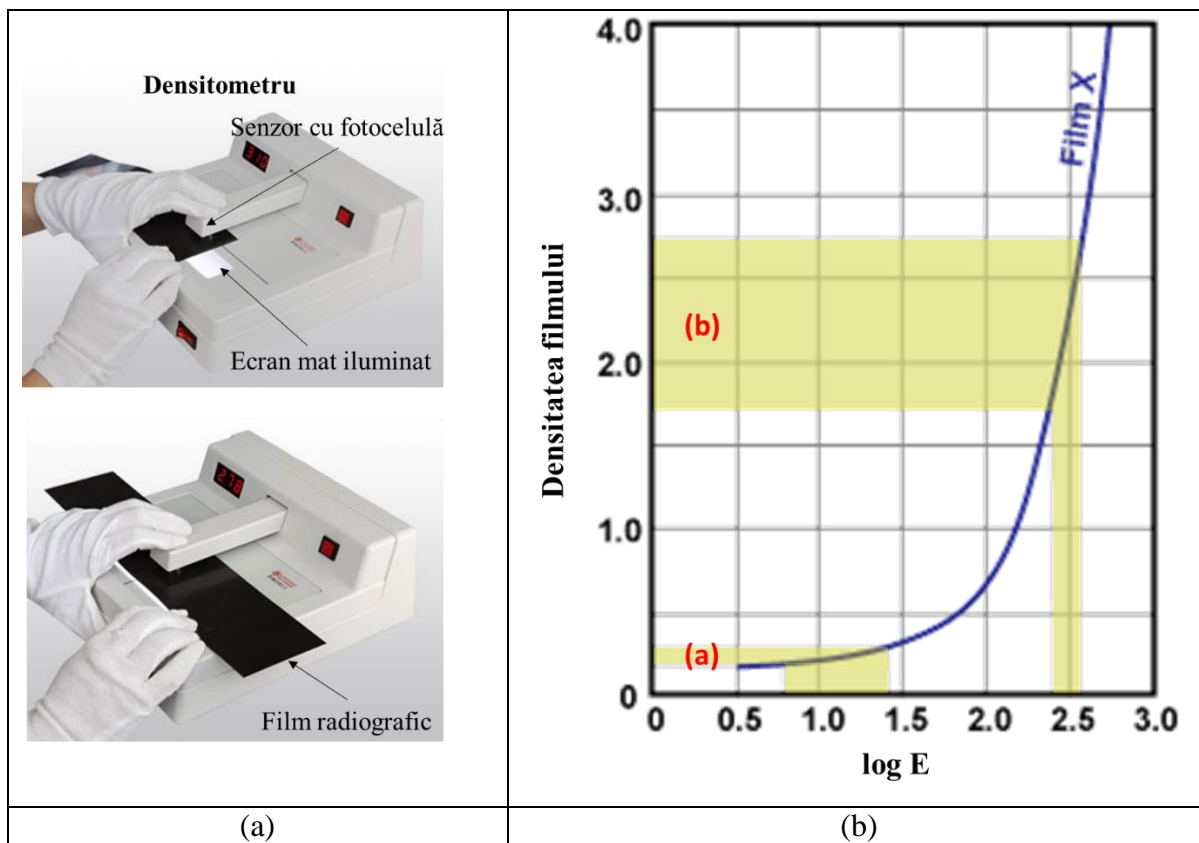


Figura 21. Verificarea densității de înnegrire a filmului radiografic cu ajutorul densitometrului (a). Curbă caracteristică teoretică pentru un film radiografic cu exemplificarea influenței modificării logaritmului expunerii asupra modificării densității filmului în doua zone de pe curbă (b) [3].

Densitatea de înnegrire a unui film poate fi exprimată și în funcție de transparența locală a filmului (T). Transparența este definită ca raportul între intensitatea luminii transmise, I , (ce trece prin film) și intensitatea luminii incidente (I_0).

$$T = \frac{I}{I_0} \rightarrow D = \log \frac{1}{T} \quad (14)$$

Folosind relația de mai sus putem calcula densitatea de înnegrire a unui film radiografic care transmite $\frac{1}{4}$ din lumina incidentă astfel:

$$D = \log \frac{1}{T} = \log \frac{1}{0.25} = \log 4 = 0,6 \quad (15)$$

Contrastul unei imagini crește odată cu creșterea densității de înnegrire. Densitatea de înnegrire general recomandată, pentru o bună redare pe filmul radiografic a formei și dimensiunilor defectelor, trebuie să fie cuprinsă între 2 și 3,5 maxim 4. O densitate mai mare va necesita o lumină foarte puternică pentru examinarea filmului radiografic. Filmele cu densități de înnegrire mai mari de 4 pot fi analizate cu echipamente special dotate cu fotocelule.

6.8.7 Ecrane intensificatoare

Imaginea captată pe filmul radiografic este formată din aproximativ 1% din radiația penetrantă ce ajunge pe suprafața filmului. Restul de aproximativ 99% din radiație trece prin film fără a contribui la formarea imaginii, ci mai degrabă contribuie la complicarea tehnicii de control și la scăderea calității imaginii (radiația ce trece prin film va da naștere la radiație retroîmprăștiată). Pentru a îmbunătăți calitatea radiografiei, prin mărirea acțiunii radiațiilor asupra filmului radiografic, se utilizează ecrane intensificatoare. Din punct de vedere constructiv există trei clase de ecrane intensificatoare: ecrane metalice, ecrane fluorescente și ecrane compozite [17].

6.8.7.1 Ecrane metalice

Acest tip de ecrane sunt foarte subțiri, realizate în general din plumb, plasate de o parte și de cealaltă a filmului radiografic. În cazul utilizării radiațiilor X, grosimea foitei de plumb plasată pe fața filmului radiografic (fața aflată înspre sursa de radiații) poate varia între 0,02 mm și 0,15 mm, în timp ce grosimea foitei din spatele filmului este de aproximativ 0,25 mm [11, 17]. În cazul utilizării radiațiilor gama, grosimea foitei de plumb de pe fața filmului este mai mare, putând ajunge la 0,2 mm. Între film și foitele de plumb trebuie asigurat un contact cât mai bun, acest lucru realizându-se prin vidarea ansamblului care conține foitele de plumb între care este intercalat filmul radiografic. Prin interacțiunea radiațiilor penetrante (raze X sau gama) cu ecranele (foitele) de plumb, anterior și posterior, iau naștere electroni secundari care contribuie la descompunerea halogenurii de argint și contribuie la formarea imaginii latente. Un alt rol al ecranelor intensificatoare de plumb este acela de a absorbi o parte din radiațiile împrăștiate (incluzând și radiațiile retroîmprăștiate), acest lucru fiind posibil și datorită faptului că aceste radiații sunt caracterizate de energie mai mică decât energia radiațiilor din fascicolul primar. Factorul de intensificare, adică factorul de creștere a rapidității filmului, poate varia între 2 și 5 în funcție de grosimea ecranelor și de calitatea radiației. Factorul de intensificare sau de amplificare a ecranelor este definit ca raportul dintre expunerea necesară pentru penetrarea aceleiași grosimi de material, fără ecranul de intensificare (E), și expunerea necesară folosind ecranul de intensificare a radiațiilor (E_c).

$$f_a = \frac{E}{E_c} \quad (16)$$

În figura 22 este prezentat efectul ecranelor intensificatoare de plumb asupra calității radiografiei unei piese turnate. Radiografia din figura 22a a fost făcută fără ecrane intensificatoare iar radiografia prezentată în figura 22b a fost realizată folosind ecrane intensificatoare de plumb. Se poate observa efectul pozitiv al utilizării ecranelor intensificatoare, atât prin creșterea contrastului imaginii, cât și prin cantitatea de detalii observabile.

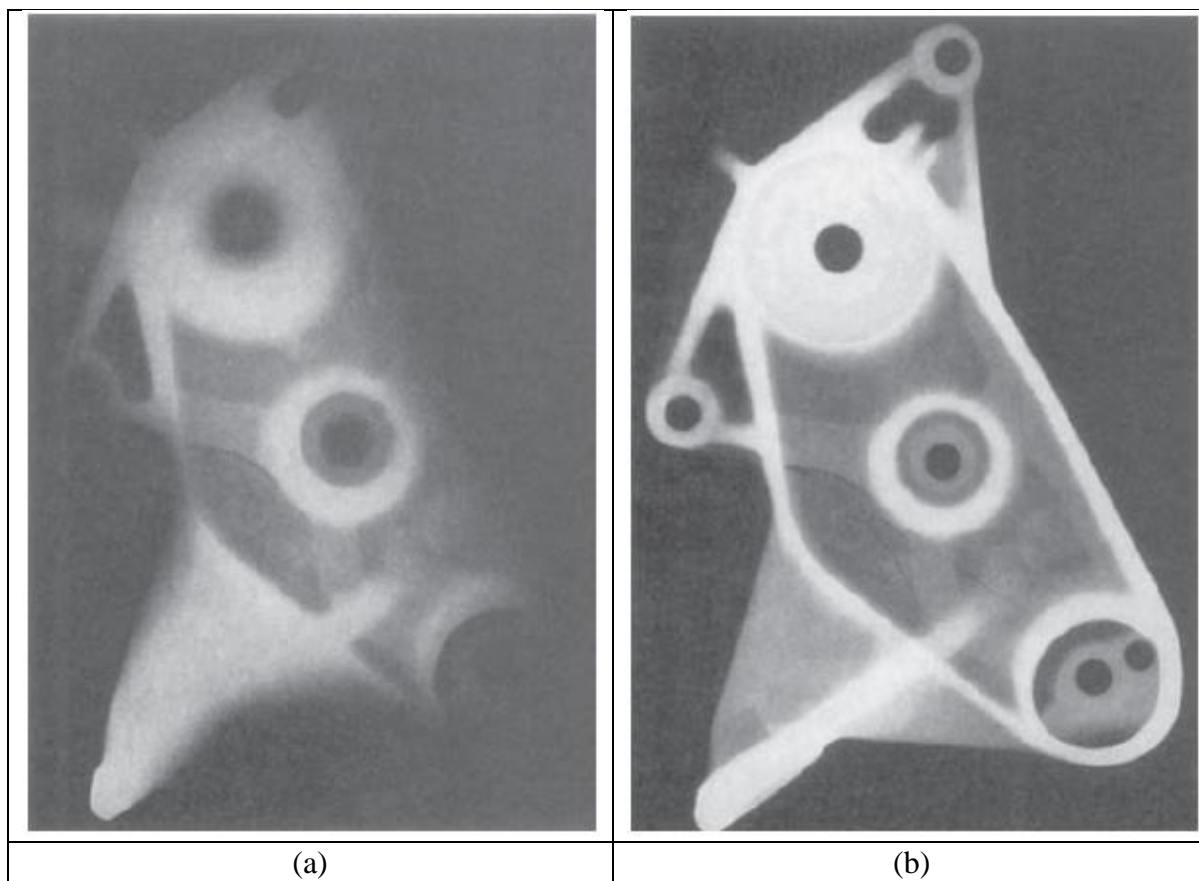


Figura 22. Influența ecranelor intensificatoare de plumb asupra calității imaginii radiografice a unei piese turnate. (a) fără ecrane intensificatoare, (b) cu ecrane intensificatoare de plumb [11].

În cazul folosirii surselor de radiații cu energie înaltă, precum ^{60}Co sau a tuburilor de raze X cu energii de 5 – 8 MeV, eficiența plumbului pe post de ecran intensificator este redusă. În aceste situații se folosesc ecrane intensificatoare de cupru sau de oțel, care conduc la imagini de o calitate superioară celor obținute cu ecranele intensificatoare de plumb [11].

6.8.7.2 Ecrane fluorescente

Fluorescența este proprietatea unor substanțe de a emite lumină în spectrul vizibil, atunci când pe suprafața lor ajunge un fascicul de radiații electromagnetice. La întreruperea fluxului de radiații electromagnetice fenomenul de emisie a materialelor fluorescente încetează. Ecranele intensificatoare fluorescente sunt formate dintr-un suport de carton sau pânză, pe care sunt depuse straturi subțiri de substanțe fluorescente precum wolframatul de calciu. Stratul fluorescent emite lumină în spectrul vizibil atât timp cât este iradiat de către radiația penetrantă, iar intensitatea emisieii luminoase depinde de intensitatea radiației incidente. Acest tip de ecrane se folosesc numai când, datorită sursei de radiații disponibilă, ar fi nevoie de timpi de expunere foarte lungi. Factorul de intensificare a acestor ecrane se definește în mod similar cu factorul de intensificare a ecranelor de plumb. Factorul de intensificare a acestor ecrane poate ajunge la 50 dar în cazuri speciale (în cazul folosirii ecranelor fluorescente de înaltă rapiditate) factorul de intensificare poate atinge valori de 100 – 130 [11, 17]. Acest tip de ecrane intensificatoare au o serie de dezavantaje precum:

- granulația mare a cristalelor de wolframat de calciu influențează negativ calitatea imaginii;
- datorită împrăștierii luminii în grosimea stratului fluorescent, unui punct luminos de pe suprafața ecranului îi corespunde o suprafață circulară înnegrită pe suprafața filmului.
- aceste ecrane nu mai îndeplinesc funcția de filtru pentru radiația împrăștiată precum ecranele din plumb.

6.8.7.3 Ecrane compozite

Ecranele compozite fluorometalice combină, într-o oarecare măsură, avantajele ecranelor de plumb (metalice) și a celor fluorescente. Arhitectura secțiunii unei casețe cu ecran intensificator compozit este următoarea: ecran anterior de plumb, ecran anterior fluorescent, film radiografic, ecran posterior fluorescent și ecran posterior de plumb. În această combinație, ecranele de plumb au rol de filtre iar ecranele fluorescente au rol de intensificare. Factorul de amplificare a ecranelor compozite fluorometalice variază între 5 și 10, ceea ce în multe cazuri este suficient [5].

6.8.8 Factori geometrici

Imaginea radiografică reprezintă imaginea umbrei obiectului investigat care este plasat între sursa de radiații și filmul radiografic. În aceste condiții, este ușor de înțeles că aspectul imaginii obținute este influențat de poziționarea relativă a sursei de radiații, a obiectului examinat și a filmului radiografic. Dispunerea relativă în spațiu a sursei de radiații, a obiectului controlat și a filmului, în cadrul unui control nedistructiv cu radiații penetrante, poartă denumirea de geometria expunerii.

6.8.8.1 Dimensiunea sursei, distanța sursă-obiect și obiect-film

În mod ideal, dimensiunea sursei (denumită tehnic pată focală) ar trebui să fie un punct. În realitate însă acest lucru nu este posibil, dimensiunea petei focale fiind cel puțin de ordinul milimetrelor pătrați. În figura 23 este prezentată schematic influența dimensiunii sursei de radiații, a distanței sursă-obiect și a distanței obiect film. Se poate observa că, în funcție de acești parametri, în jurul imaginii radiografice a obiectului apare o bandă de trecere, între detaliu și fond, de dimensiuni diferite. Această bandă poartă denumirea de neclaritate geometrică sau penumbră. În cazul ideal (imposibil practic) în care sursa de radiații este punctiformă nu se formează penumbră. Pentru a observa și a înțelege influența dimensiunii sursei (dimensiunii petei focale) asupra neclarității geometrice, cititorul este îndrumat să analizeze și să compare figura 23a cu figura 23b. În cazul în care sursa are o anumită dimensiune (figura 23b), se poate observa apariția unei benzi de trecere între detaliu și fond (penumbră). Apariția penumbrei nu poate fi împiedicată, dar dimensiunile acesteia pot fi micșorate alegând o geometrie optimă a expunerii. Analizând comparativ figurile 23b și 23d se poate observa efectul distanței sursă-obiect asupra neclarității geometrice a imaginii. Se poate observa că, cu cât distanța dintre sursa de radiații și obiectul supus examinării este mai mare, cu atât lățimea penumbrei (neclaritatea geometrică) este mai mică. Creșterea distanței

dintre sursa de radiații și obiect trebuie făcută cu precauție, luându-se în considerare atenuarea prin distanță a fascicolului de radiații.

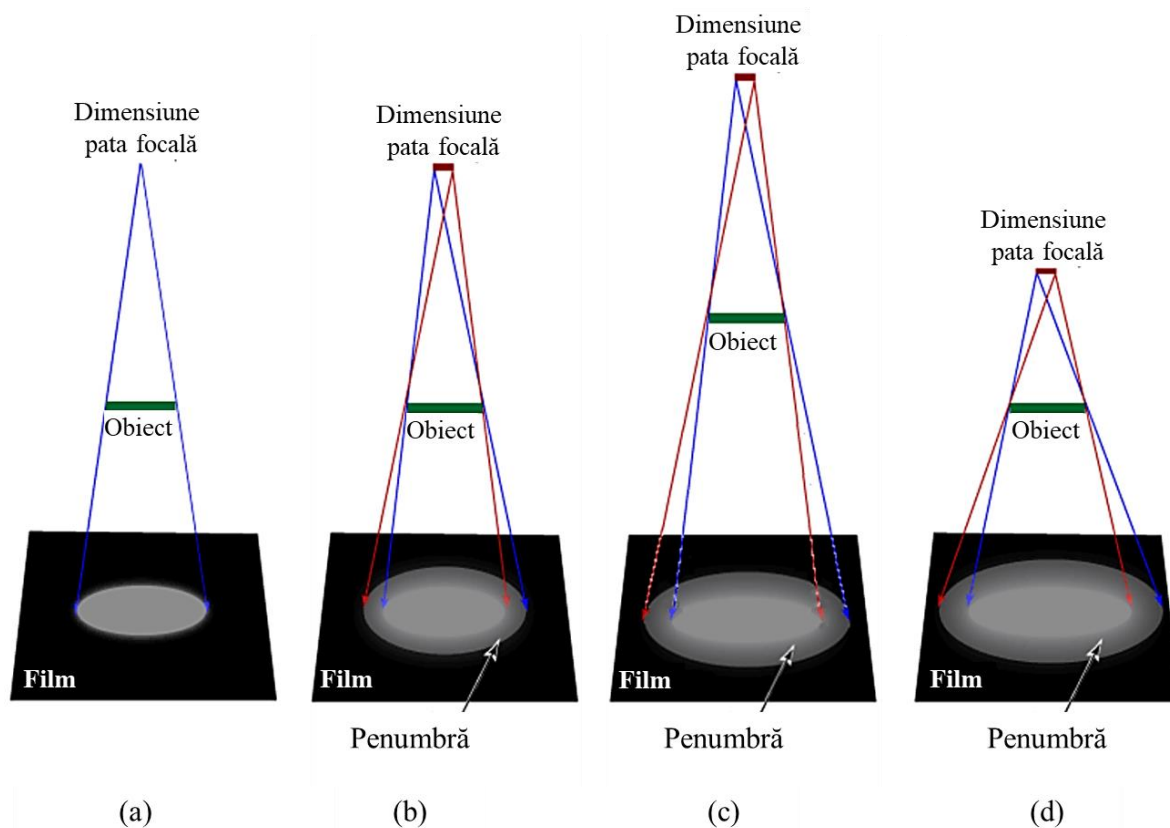


Figura 23. Influența factorilor geometrici asupra neclarității geometrice sau penumbrei [3, 12].

Influența distanței dintre obiectul examinat și filmul radiografic se poate observa analizând comparativ figurile 23b și 23c. Se poate observa că cu cât distanța obiect-film este mai mare, cu atât neclaritatea geometrică a imaginii este mai mare. În general, pentru a obține o imagine cu definiție ridicată, distanța obiect-film se recomandă a fi cât mai mică posibil. Există și situații în care în mod intenționat distanța obiect-film este mai mare, în mod special atunci când imaginea obținută pe film se dorește a fi mai mare decât dimensiunile efective ale obiectului studiat.

Pentru a rezuma cele discutate mai sus, putem menționa că pentru a obține o imagine de înaltă definiție trebuie îndeplinite următoarele condiții [16]:

- dimensiunea sursei (dimensiunea petei focale) trebuie să fie cât mai mică posibil;
- distanța sursă-obiect trebuie să fie cât mai mare posibil;
- Distanța obiect-film trebuie să fie cât mai mică posibil.

Uzual, penumbra (lățimea acesteia) este limitată la valori de 1/100 din grosimea materialului examinat (maxim 1 mm), pentru a nu fi observată distinct pe conturul imaginii. Lățimea penumbrei (U_g) poate fi calculată folosind schița din figura 24.

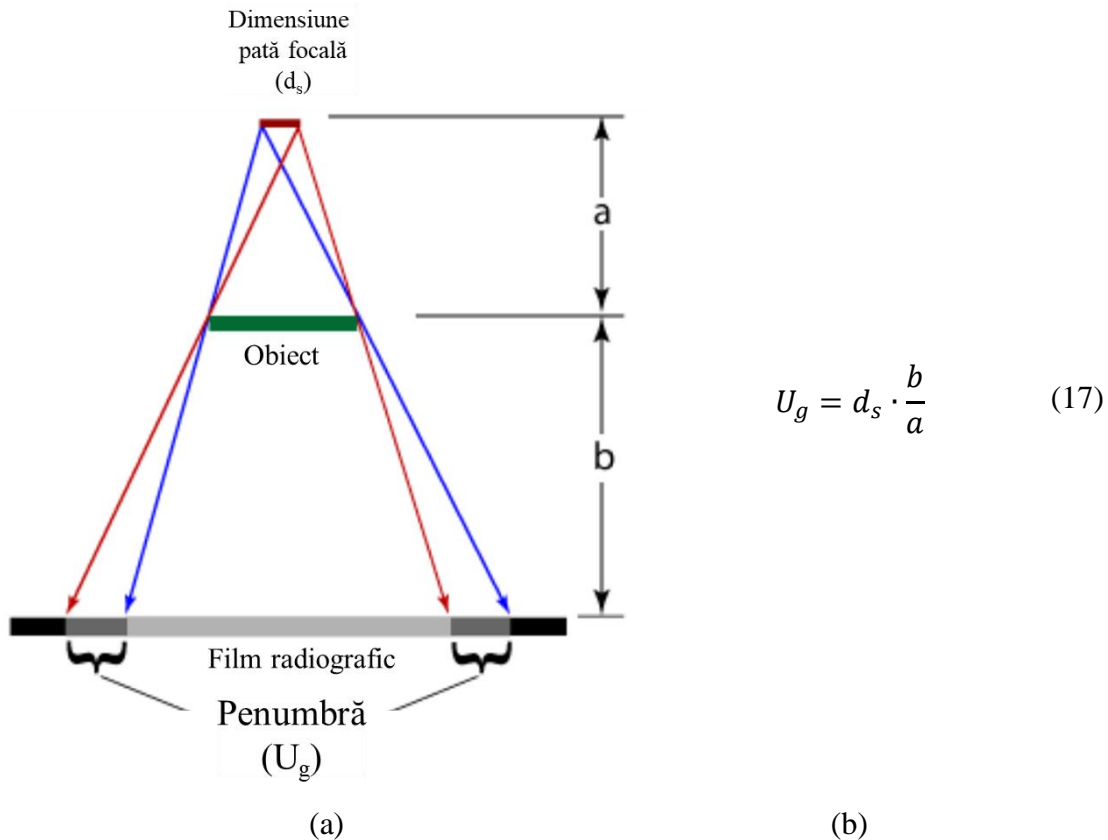


Figura 24. Parametrii geometrici care se iau în considerare pentru calcularea penumbrei unei imagini radiografice (a) și relația de calcul a lățimii penumbrei (b) [3].

În relația de calcul a penumbrei (U_g), d_s reprezintă mărimea petei focale, a reprezintă distanța sursă-obiect și b reprezintă distanța obiect-film.

6.8.9 Forma, dimensiunea și orientarea defectului

O influență deosebit de mare asupra calității unei imagini radiografice o are forma, dimensiunea și orientarea defectului în raport cu fascicolul de radiații penetrante. Astfel, defectele cu laturile paralele cu fascicolul de radiații se vor observa mai bine pe filmul radiografic (produc imagini mai bine conturate) decât defectele de formă sferică sau elipsoidală (de exemplu suflurile). Totuși, defectele volumice, precum suflurile, se vor observa indiferent de orientarea acestora în raport cu fascicolul de radiații sau de dimensiunea sursei, cu condiția să aibă o dimensiune detectabilă prin această tehnică. În cazul defectelor plane fine (cu deschidere/lățime mică), de tipul fisurilor, variația densității de înnegrire în raport cu cea a imaginii scade pe măsură ce dimensiunea sursei și unghiul de incidență cresc. Odată cu creșterea unghiului de incidență, imaginea defectului pe filmul radiografic este distorsionată și mai slab conturată (definită), iar la unghiuri suficient de mari defectele cu deschidere mică pot scăpa neobservate (devin nedetectabile). Aceste aspecte sunt prezentate în figura 25.

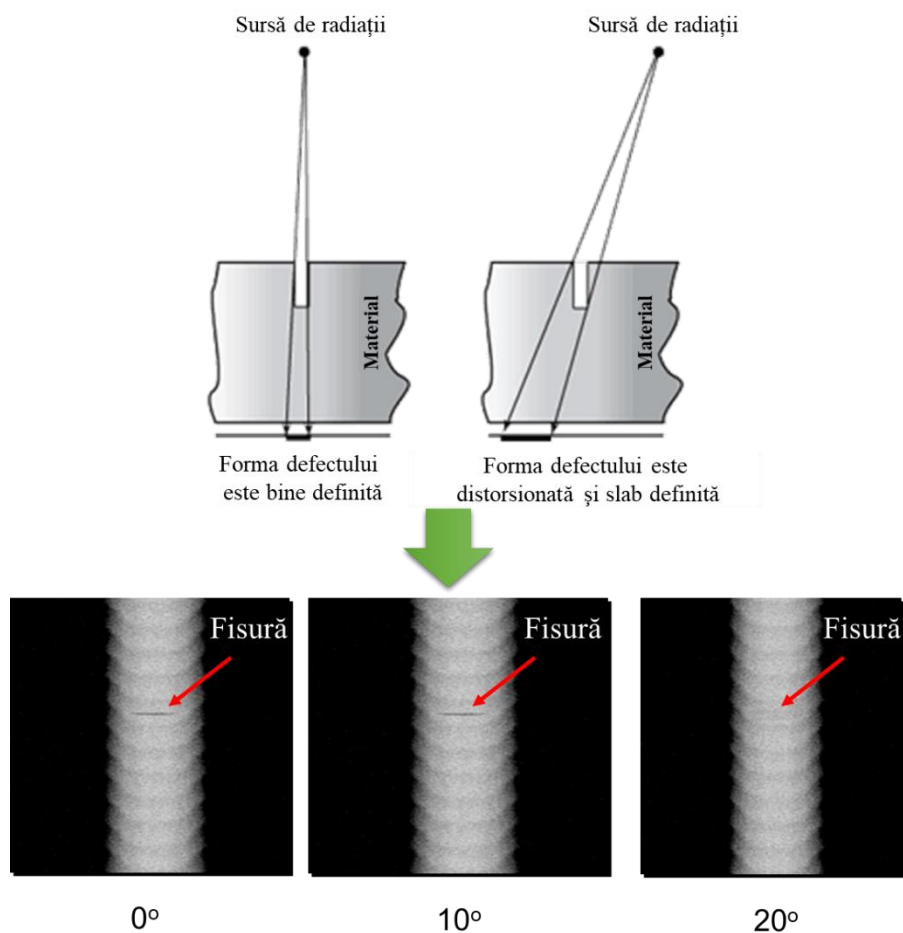


Figura 25. Influența orientării defectului în raport cu fascicolul de radiații asupra detectabilității defectului și definiției imaginii defectului [12].

Pe lângă factorii mai sus precizați, o influență negativă asupra definiției unei imagini radiografice o are și o eventuala mișcare a sursei, a obiectului examinat sau a filmului radiografic în timpul examinării. Deplasări ale sursei, obiectului sau filmului pot fi induse de vibrațiile unor echipamente aflate în vecinătatea locului unde se realizează controlul. Aceste deplasări produc o imagine neclară, cu definiție scăzută [11].

6.9 Indicatori de calitate a imaginii radiografice

Prin optimizarea variabilelor care au fost anterior discutate, este posibilă obținerea unor imagini radiografice de înaltă calitate. Scopul celui care realizează controlul cu radiații penetrante este să obțină imaginea cu cea mai înaltă calitate posibilă a obiectului radiografiat. Calitatea tehnicii radiografice este stabilită prin compararea cu imaginea unui indicator de calitate a imaginii (IQI - Image Quality Indicators) [15]. Practic, se determină pe filmul radiografic limita de detecție a unor elemente cu dimensiuni cunoscute, utilizând un etalon de referință. În prezent sunt utilizate patru tipuri de indicatori standardizați de calitate a imaginii, în tabelul 6 fiind prezentate principalele lor caracteristici.

Tabelul 6. Principalele tipuri de indicatori de calitate a imaginii.

Tipul indicatorului	Aspectul indicatorului
<p>IQI cu fire, EN 462-1, JIS [10, 18] Conțin 6 sau 7 fire de grosimi diferite dispuse paralel și înglobate într-un material plastic. Calitatea imaginii se apreciază prin cel mai subțire fir perceput pe o lungime de cel puțin 10 mm.</p>	
<p>IQI cu trepte și găuri, EN 462-2 [10, 18] Este o piesă în trepte (6 trepte de grosimi diferite), fiecare treapta având una sau două orificii de diametru egal cu grosimea treptei. Indicatorul poate avea formă dreptunghiulară, trapezoidală sau hexagonală. Calitatea imaginii se apreciază pe baza grosimii treptei pentru care se percep pe film orificiile.</p>	
<p>IQI cu orificii, ASTM E 1742-95 [14, 15] Sunt plăcuțe plane în care sunt practicate 3 găuri a căror diametre sunt notate cu 1T, 2T și 4T, T fiind grosimea plăcuței. Calitatea imaginii se apreciază pe baza diametrului celei mai mici găuri vizibile pe radiografie.</p>	
<p>IQI duplex cu fire duble, EN 462-5 [15, 18] Conțin o serie de 13 elemente, fiecare element fiind alcătuit din 2 fire cu diametre egale, dispuse la o distanță egală cu diametrul firelor (diametrul firelor este crescător). Calitatea imaginii se apreciază pe baza ultimei perechi de fire în care firele se disting separat în imaginea radiografică.</p>	

Indicatorul de calitate a imaginii se radiografiază de obicei suprapus peste obiectul supus controlului (pentru a crea condiții cât mai dificile), astfel ca imaginea sa să apară în cadrul zonei controlate. Un exemplu de plasare a indicatorilor de calitate a imaginii în cazul examinării unui cordon de sudură este prezentat în figura 26.

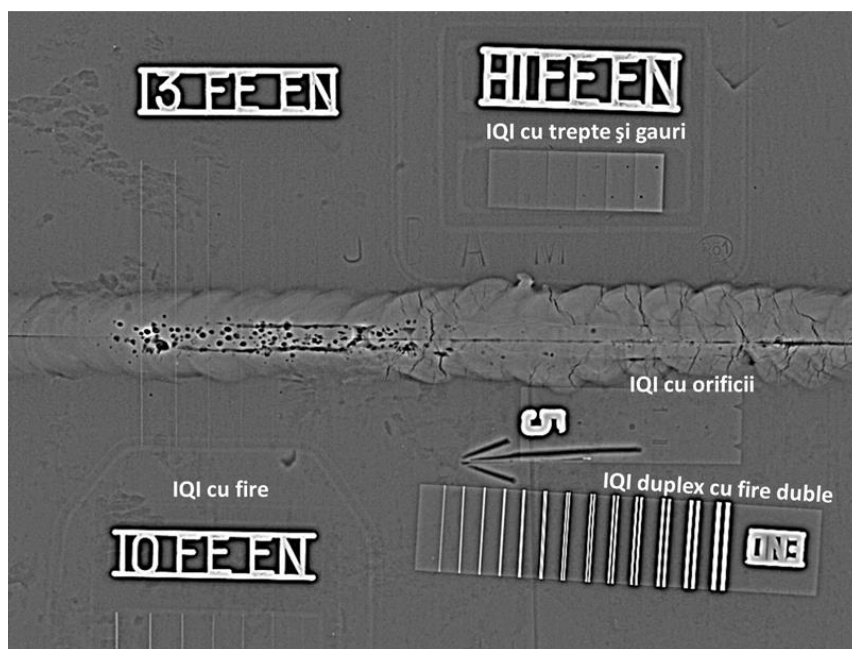
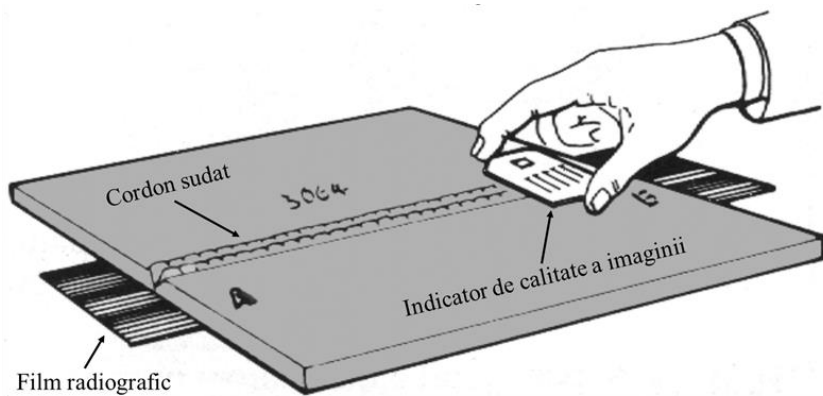


Figura 26. Poziționarea indicatorilor de calitate a imaginii în cazul examinării cu radiații penetrante a unui cordon de sudură [18, 19].

Acești indicatori de calitate se recomandă să fie realizați din același material cu materialul obiectului supus examinării, sau dintr-un material cu proprietăți similare de absorbție a radiațiilor. Rolul indicatorului de calitate este de a permite verificarea executării corecte a radiografiei, fiind un martor al întregului proces de examinare cu radiații penetrante.

6.10 Considerații generale privind examinarea îmbinărilor sudate

Probabil cea mai utilă tehnică de control nedistructiv pentru examinarea calității unei îmbinări sudate este controlul cu radiații penetrante. Cea mai eficientă tehnică utilizată la examinarea unui cordon de sudură este cea în care radiația trece printr-un singur perete al obiectului examinat (printr-o singură grosime). În acest caz, filmul radiografic este plasat în contact cu suprafața piesei pe partea opusă sursei de radiații. Această tehnică este denumită iradiere printr-un singur perete, deoarece radiația trece printr-un perete al obiectului (o singură grosime), iar respectiva grosime este evaluată cu ajutorul imaginii captate pe filmul radiografic.

Câteva modalități de examinare a unor îmbinări sudate prin tehnici de iradiere printr-un singur perete sunt prezentate în figura 27 [10].

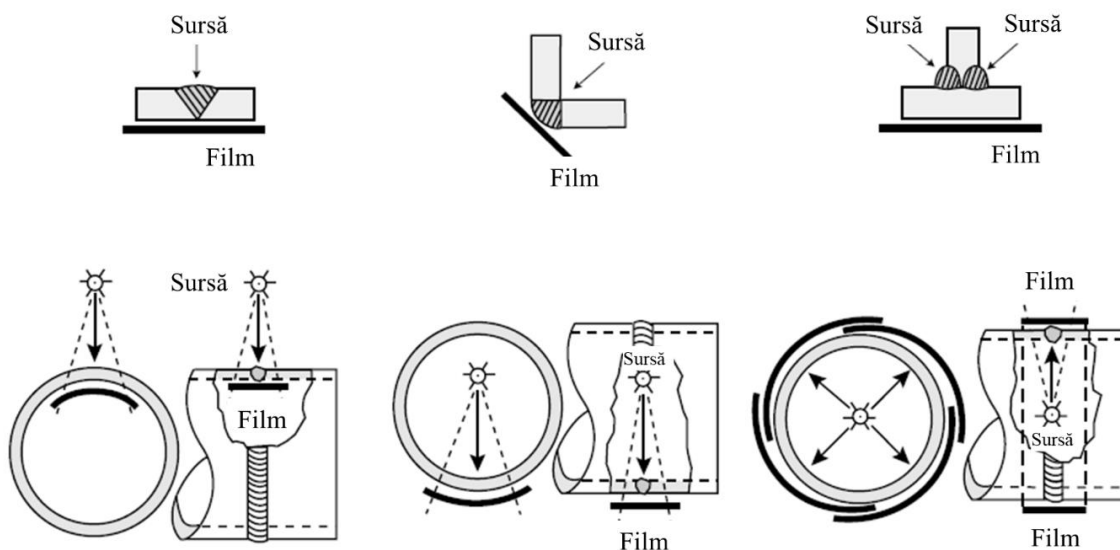


Figura 27. Prezentare generală a tehnicilor de iradiere printr-un singur perete [10].

Cea de-a doua grupă de tehnici presupune iradierea piesei prin doi pereți (de exemplu în cazul țevilor) și interpretarea imaginii îmbinării dintr-un singur perete. În acest caz, radiația trece prin cei doi pereți, dar numai zona situată cel mai aproape de film este evaluată [13]. La realizarea unei astfel de examinări trebuie ținut cont de faptul că timpul de expunere se calculează luând în calcul grosimea ambilor pereți. Sursa de radiații poate fi lipită de peretele obiectului sau se poate afla la o anumită distanță, pentru a se obține o distanță focală mai mare. Imaginea produsă prin acest tip de expunere este de calitate mai slabă decât imaginea obținută prin iradierea printr-un singur perete. Această tehnică se adoptă atunci când dimensiunea țevii nu permite plasarea cassettei cu film în interiorul țevii. Pentru controlul întregii circumferințe sunt necesare mai multe expuneri succesive. Această tehnică este prezentată în figura 28.

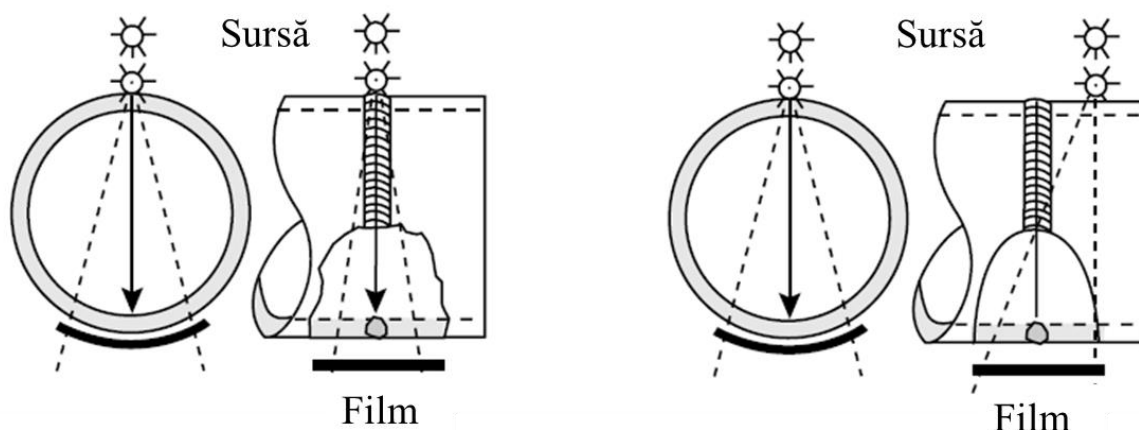


Figura 28. Iradiere prin doi pereți cu interpretarea imaginii îmbinării dintr-un singur perete [10].

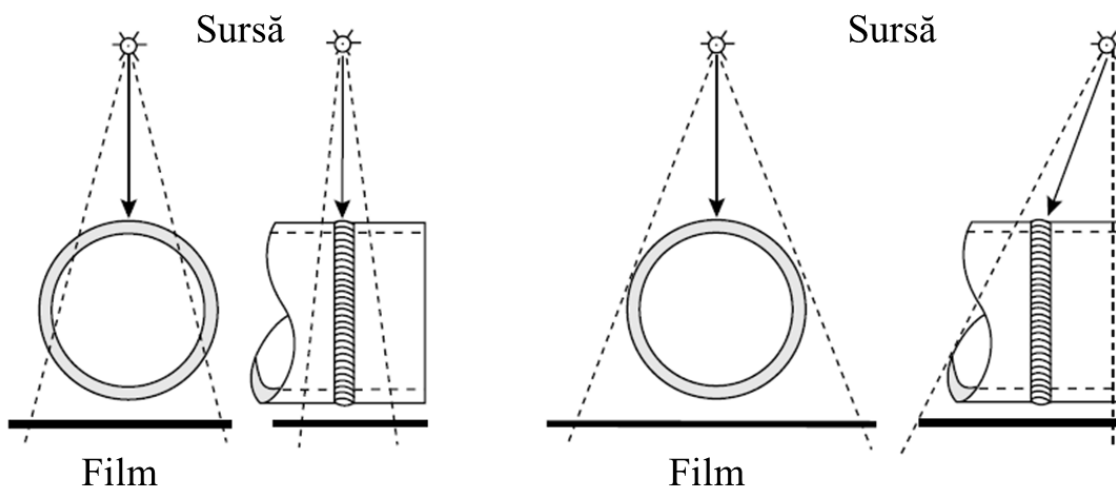


Figura 29. Iradiere prin doi pereți cu interpretarea imaginii din ambii pereți [10].

Cea de-a treia tehnică radiografică presupune trecerea radiației prin ambii pereți ai obiectului examinat și examinarea imaginii radiografice dată de ambii pereți. Această tehnică este, de obicei, limitată la piese cu diametre mici, în mod obișnuit egale sau mai mici de 3,5 inch. Această tehnică este ilustrată în figura 29. Sursa de radiații este poziționată direct peste zona de interes, astfel are loc suprapunerea imaginii din peretele superior peste imaginea dată de peretele inferior. Ca o alternativă la acest tip de poziționare, sursa poate fi deplasată cu un unghi de aproximativ 15° pentru a observa distinct atât partea superioară cât și partea inferioară [10]. Deoarece imaginea cordonului de sudură rezultă prin proiecție oblică pe film, imaginea cordonului apare sub forma unei elipse. Acest tip de iradiere este cunoscut sub denumirea de iradiere prin elipsă.

6.11 Radiografia digitală

În ultimii ani s-au dezvoltat o serie întreagă de tehnici moderne de radiografiere grupate sub denumirea generală de radiografie digitală. Radiografia digitală este o forma relativ nouă de realizare a controlului nedistructiv cu radiații penetrante, care nu necesită folosirea filmelor radiografice, iar imaginea este captată direct pe ecrane speciale cu fosfor sau ecrane speciale cu senzori microelectronici. Radiografia digitală prezintă o serie de avantaje față de radiografia clasică (cu film radiografic) cum ar fi: nu este nevoie de cameră întunecată pentru dezvoltarea filmului, radiografia poate fi ușor digitalizată și îmbunătățită digital cu ajutorul diverselor filtre, radiografiile sunt mult mai ușor de păstrat, etc.

Cele mai cunoscute tehnici de radiografie digitală sunt [5, 10, 15]:

- radiografia computerizată;
- radiografia în timp real;
- radiografia directă (cu panouri digitale);
- tomografia computerizată;

În cazul radiografiei computerizate, înregistrarea imaginii se face pe o placă specială acoperită cu particule de fosfor. Radiațiile X care penetrează materialul analizat vor excita

particulele de fosfor. După expunere, placa este analizată cu ajutorul unui echipament special care convertește informația stocată pe placă în informație digitală. După digitizare, informația de pe ecran este ștearsă și ecranul poate fi reutilizat.

Radiografia în timp real presupune posibilitatea obținerii și analizării radiografiei obiectului în timp real. Achiziția imaginii (radiografiei) este practic instantanee. Acest lucru permite analiza unor piese care se află în mișcare (rotație sau translație). Această tehnică oferă următoarele avantaje: este posibilă radiografierea unei piese printr-o singură expunere, analiza piesei din diferite unghiuri, durata examinării este mai mică. Principalele ei dezavantaje sunt: necesită detector de radiații în timp real sau amplificator de imagine, necesită cameră video specială (foarte sensibilă), necesită calculator cu capacitate mare de stocare, analiză și redare date, necesită sisteme de poziționare a probei.

Radiografia directă sau radiografia cu panouri digitale este un tip special de radiografie în timp real, la care achiziția radiografiei nu se face cu amplificatori de imagine sau camera video ci cu ajutorul unor ecrane speciale, care conțin un număr foarte mare de senzori, care convertesc radiația ce a penetrat proba în semnal electric. Fiecare senzor de pe suprafața ecranului este echivalentul unui pixel iar luminozitatea lui va fi proporțională cu intensitatea radiației ce ajunge pe el.

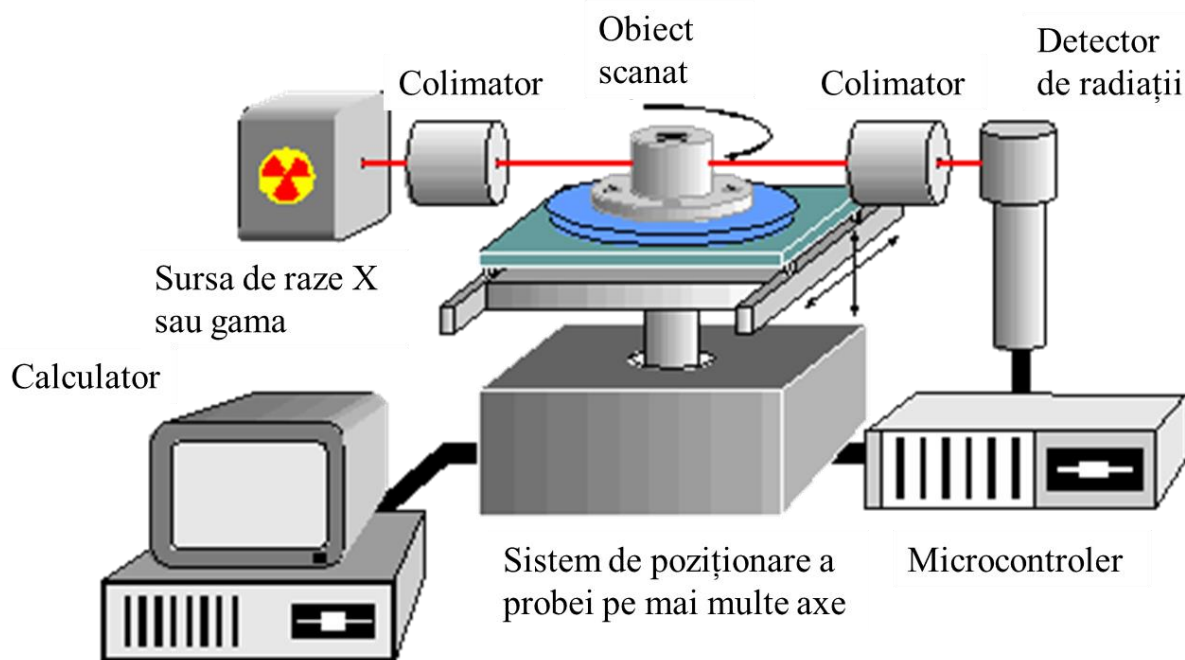


Figura 30. Schema de principiu a unui echipament de tomografie computerizată [20].

Realizarea unei tomografii computerizate necesită un echipament de radiografie în timp real, un sistem special de poziționare a probei și un software special (figura 30). Echipamentul realizează o multitudine de radiografii în timp ce piesa se deplasează. Aceste imagini sunt combinate pentru a forma o imagine 2D. Imaginile 2D sunt combinate pentru a forma imaginea 3D a piesei examinate.

6.12 Avantajele și dezavantajele examinării cu radiații penetrante

Principalele avantaje ale tehnicii de examinare cu radiații penetrante sunt:

- poate fi folosită pentru examinarea oricărui tip de material;
- poate fi folosită la examinarea unui ansamblu de piese;
- pregătirea suprafeței este minimă;
- este o tehnică sensibilă la variații dimensionale, coroziune, porozitate, fisuri și schimbări ale densității materialului;
- se pot detecta defecte de suprafață și din interiorul pieselor;
- oferă o imagine permanentă a rezultatului controlului.

Cele mai importante **dezavantaje** ale examinării cu radiații penetrante sunt următoarele:

- necesită măsuri de precauție speciale din cauza radiațiilor de intensitate mare;
- program de pregătire laborios pentru personal;
- necesită acces la două suprafețe diametral opuse ale piesei (pentru film și pentru sursa de radiații);
- orientarea defectelor în raport cu fascicolul de radiații poate fi critică;
- determinarea adâncimii unui defect este imposibilă fără examinări suplimentare (la diferite unghiuri);
- cost ridicat al echipamentului.

6.13 Defectoscopie cu raze X vs. Defectoscopie cu raze gama

Avantajele utilizării radiațiilor gama comparativ cu radiațiile X, sunt:

- nu este nevoie de sursă de alimentare cu curent;
- nu este nevoie de circuit de răcire;
- echipamentul este compact și ușor de transportat;
- echipamentul este robust și fiabil;
- spectrul de radiație este discret, efectul de împrăștiere fiind minim;
- echipament ieftin;
- radiația gama are capacitate de penetrare foarte mare.

Dezavantajele utilizării radiațiilor gama comparativ cu radiațiile X, sunt:

- calitatea imaginii radiografice mai slabă;
- timpul de expunere este mai lung (afectând productivitatea);
- sursele radioactive trebuie înlocuite periodic (în funcție de timpul de înjumătățire);
- sursa radioactivă nu poate fi oprită;
- sursa radioactivă trebuie manevrată de la distanță;
- trebuie respectate strict măsurile speciale de protecția și securitatea muncii.

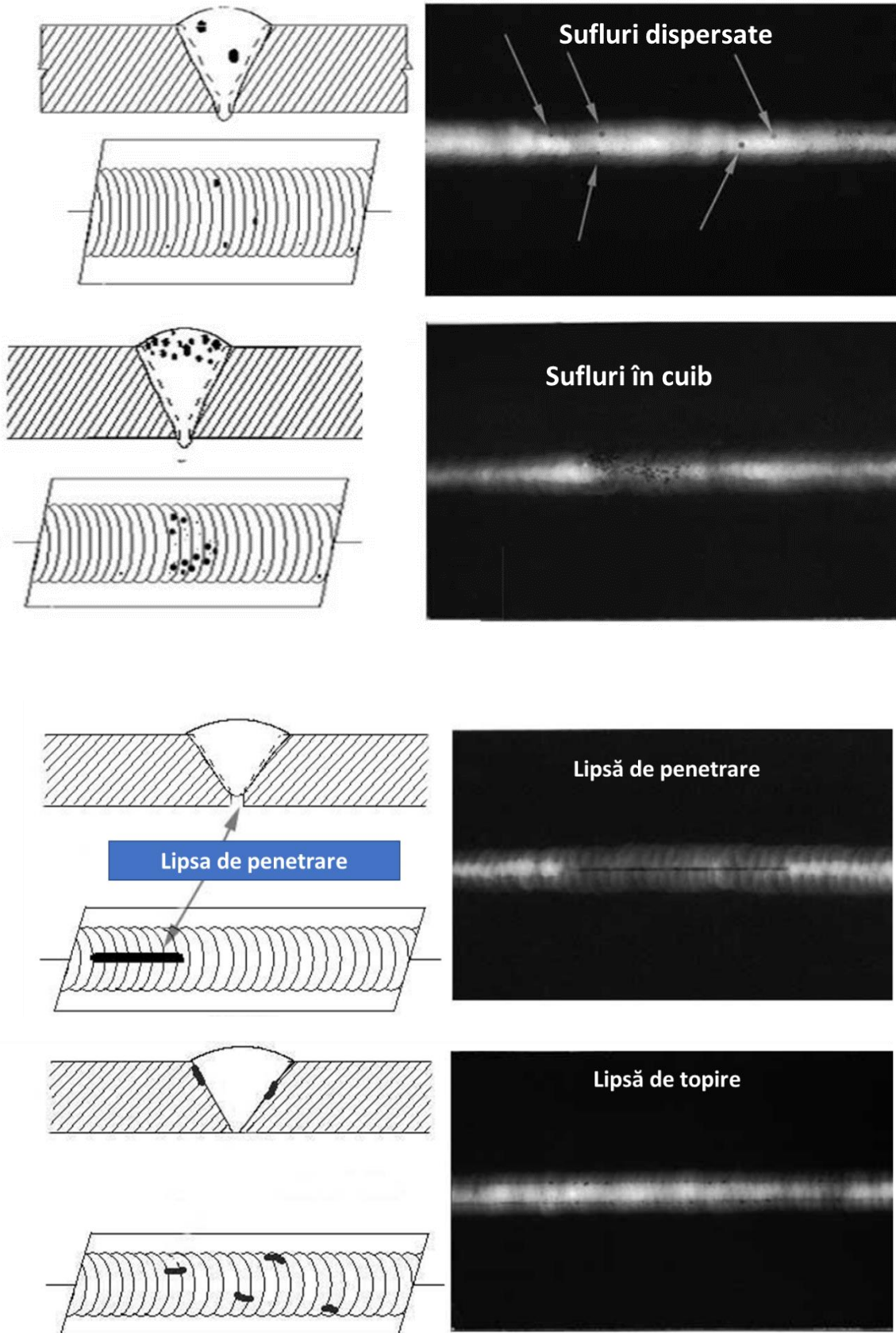
6.14 Bibliografie

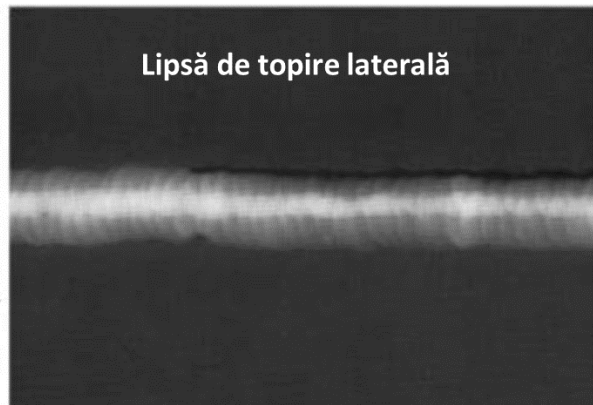
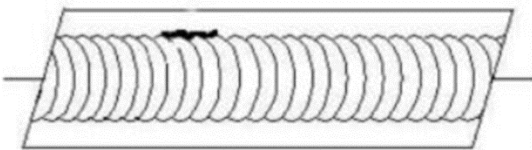
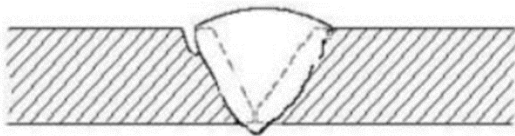
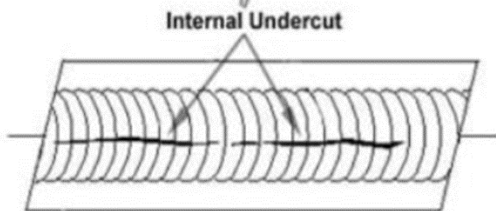
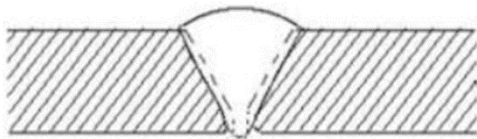
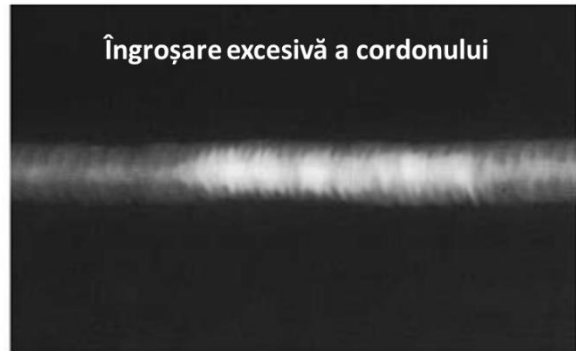
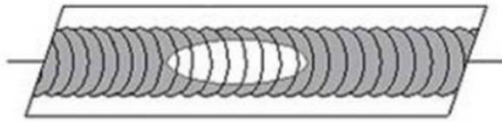
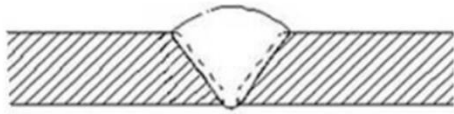
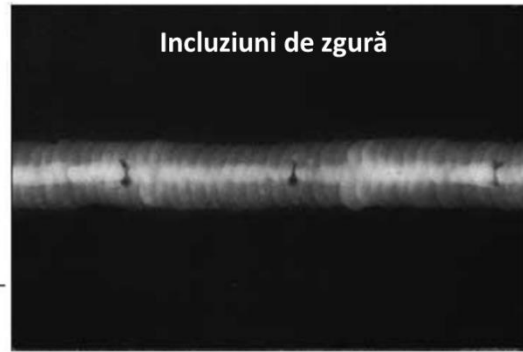
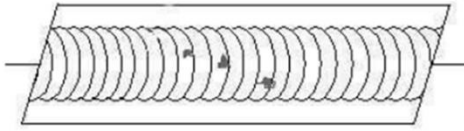
- [1] B. Feldman, The Nobel Prize: A History of Genius, Controversy, and Prestige, Editura Arcade Publishing, 2002, ISBN-13: 978-1611457247.
- [2] B.A. Shalev, 100 Years of Nobel Prizes, Editura The American Group, 2003, ISBN-13: 978-0935047370
- [3] A. Hijazi, Introduction to non-destructive testing technique, Radiographic Testing, disponibil online: <https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Radiographic%20Testing.pdf> *
- [4] <https://www.freepng.es/png-kt0n8h/> *
- [5] V.I. Safta, V.I. Safta, Defectoscopie nedistructivă industrială, Editura Sudura, 2001, ISBN 973-99425-6-3.
- [6] V. Pop, I. Chicinaș, N. Jumate, Fizica materialelor. Metode experimentale, Editura Presa Universitară Clujeană, 2001, ISBN 973-610-036-7
- [7] <https://www.geo.arizona.edu/xtal/geos306/fall13-11.htm> *
- [8] <http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/inst1/xrays.htm> *
- [9] P. Vilaca, Radiographic testing (RT) technique, Aalto University, School of Engineering, disponibil online: <https://mycourses.aalto.fi/course/view.php?id=17818§ion=1> *
- [10] C. J. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation, Editura The McGraw-Hill Companies, Inc. 2001, ISBN: 13: 978-0071777148
- [11] GE Inspection Technologies, Industrial Radiography - Image forming techniques, 2008, disponibilă online: https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/industrial_radiography_image_forming_techniques_english_4.pdf *
- [12] https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/cc_rad_index.htm *
- [13] P. Ciorău, D. Coca, I. Crudu et al. Încercarea Materialelor, Controlul nedistructiv al materialelor, Editura Tehnică, Bucuresti 1986.
- [14] T. Luthi, Non-Destructive Evaluation Methods, 2013, disponibil online: [https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20\(2014\).pdf](https://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20(2014).pdf) *
- [15] M. Bodea, Sudarea și procedee conexe, Editura UT Press, Cluj Napoca 2016, 978-606-737-143-7.
- [16] W. R. Garrett, H. R. Splettstosser, D. E. Titus et al., Radiography in Modern Industry, Editura Eastman Kodak Comapny, disponibil online: <http://www.pqt.net/Radiography-in-Modern-Industry-4th-Edition.pdf> *
- [17] P.E. Mix, Introduction to nonddestructive testing, A trening guide, Editura Wiley Interscience, 2005, ISBN-13 978-0-471-42029-3.
- [18] R. Halmshaw, T. Kowol, Image quality indicators in industrial radiography, 2001, disponibil online: http://www.cmarques.com.br/dbimg/pdf/85_115.pdf *
- [19] https://www.vidisco.com/ndt_solutions/ndt_info_center/ndt_x_ray_gallery/ *
- [20] M.Iovea, Gh.Georgescu, C.Rizescu, P.Chitescu, Some Aspects Concerning the 2D and 3D Computerized Tomography Applied in Non-Destructive Testing, NDT.net, 1999, Vol. 4 No. 7.

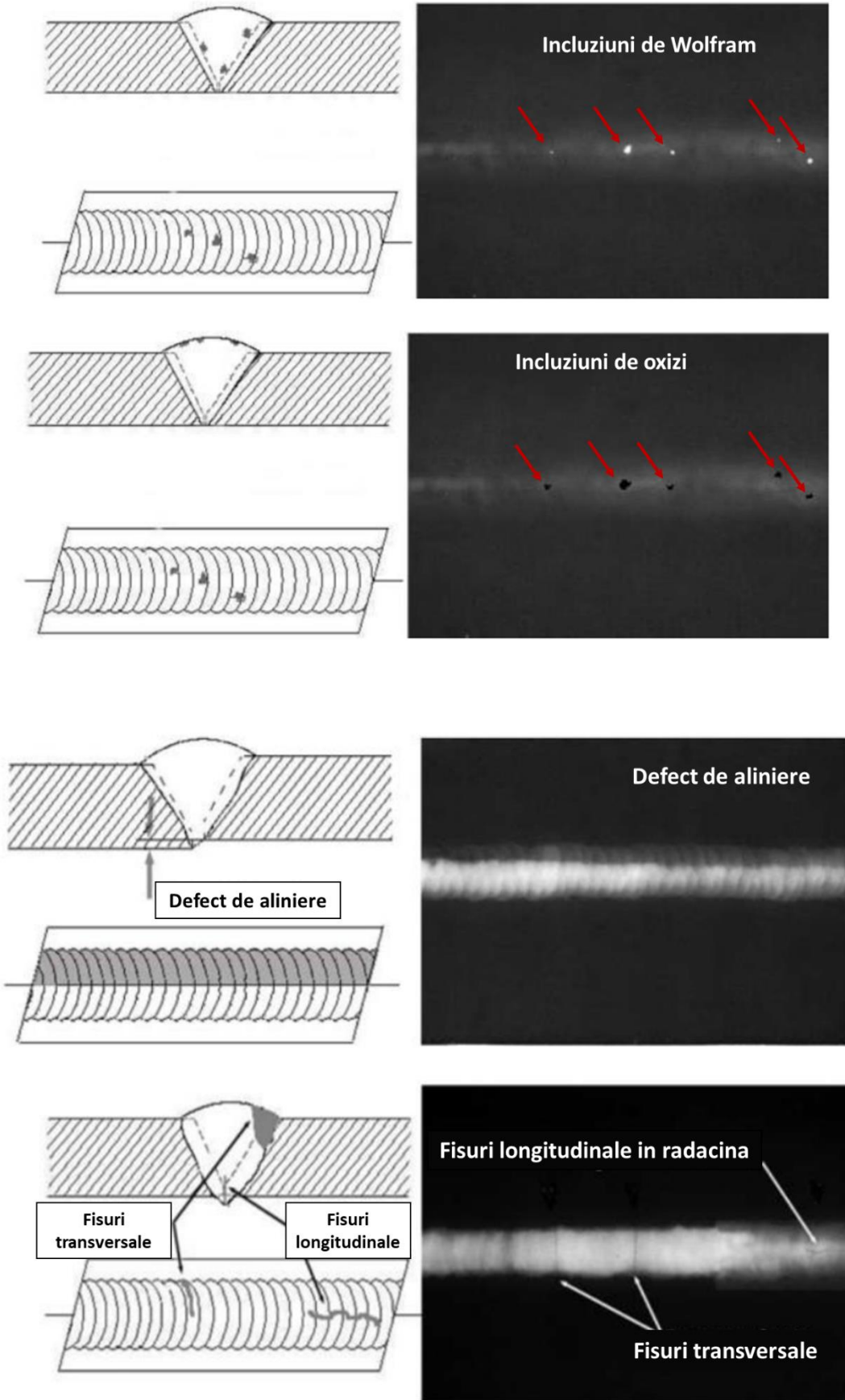
* Surse bibliografice disponibile online la data de 07.02.2019

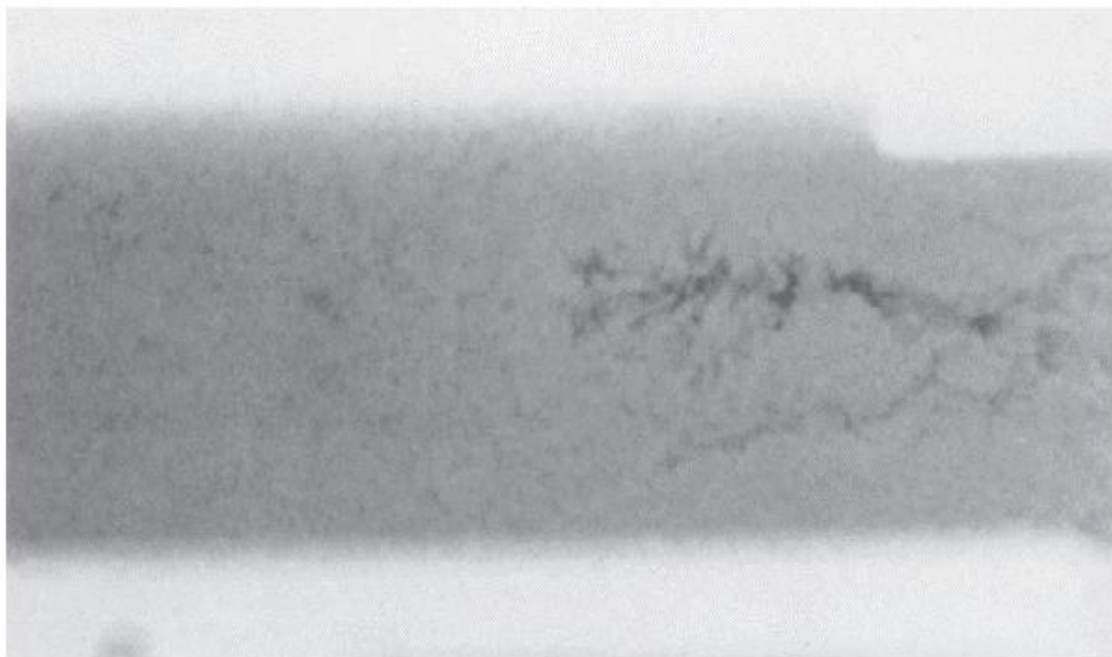
Anexa 1.

Radiografii ale unor îmbinări sudate și piese obținute prin turnare [9, 11, 12, 19]





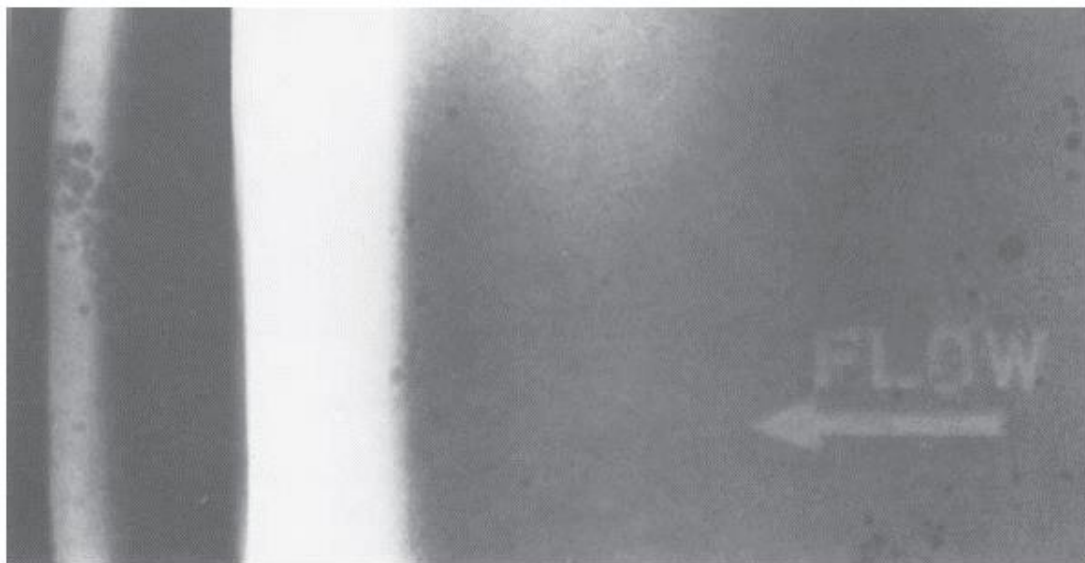




Fisuri rezultate în urma contracției la solidificare a unei piese turnate din aliaj de aluminiu



Fisuri rezultate în urma contracției la solidificare a unei piese turnate din aliaj de aluminiu



Sufluri într-o piesă turnată din aliaj de aluminiu.

A 2.3. Controlul nedistructiv cu pulberi magnetice

- **ISO 24497-1:2007** Non-destructive testing – Metal magnetic memory – Part 1: Vocabulary
- **ISO 9934-1:2015** Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Part 1: General principle
- **ISO 3059:2012** Non-destructive testing – Penetrant testing and magnetic particle testing – Viewing condition
- **ISO 24497-2:2007** Non-destructive testing – Metal magnetic memory – Part 2: General requirements
- **ISO 9934-2:2015** Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Part 2: Detection media
- **ISO 9934-3:2015** Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Part 3: Equipment
- **ISO 4986:2010** Steel castings – Magnetic particle inspection
- **ISO 17638:2016** Non-destructive testing of welds – Magnetic particle testing
- **ISO 23278:2015** Non-destructive testing of welds – Magnetic particle testing of welds – Acceptance levels
- **ISO 24497-3:2007** Non-destructive testing – Metal magnetic memory – Part 3: Inspection of welded joints
- **ISO 10893-3:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 3: Automated full peripheral flux leakage testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) ferromagnetic steel tubes for the detection of longitudinal and/or transverse imperfections
- **ISO 10893-5:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 5: Magnetic particle inspection of seamless and welded ferromagnetic steel tubes for the detection of surface imperfection

A 2.4. Controlul nedistructiv cu curenți turbionari

- **ISO 12718:2008** Non-destructive testing – Eddy current testing – Vocabulary
- **ISO 15549:2008** Non-destructive testing – Eddy current testing – General principles
- **ISO 15548-1:2013** Non-destructive testing – Equipment for eddy current examination – Part 1: Instrument characteristics and verification
- **ISO 15548-2:2013** Non-destructive testing – Equipment for eddy current examination – Part 2: Probe characteristics and verification
- **ISO 15548-3:2008** Non-destructive testing – Equipment for eddy current examination – Part 3: System characteristics and verification
- **EN ISO 20339** Equipment for eddy current examination – Array probe characteristics and verification
- **ISO 2360:2003** Non-conductive coatings on non-magnetic electrically-conductive basis materials – Measurement of coating thickness – Amplitude-sensitive eddy current method

- **ISO 20669:2017** Non-destructive testing – Pulsed eddy current testing of ferromagnetic metallic material components
- **ISO 21968:2005** Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials – Measurement of coating thickness – Phase-sensitive eddy current method
- **ISO 17643:2015** Non-destructive testing of welds – Eddy current testing of welds by complex-plane analysis
- **ISO 10893-1:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 1: Automated electromagnetic testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) steel tubes for the verification of hydraulic leak tightness
- **ISO 10893-2:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 2: Automated eddy current testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) steel tubes for the detection of imperfections

A 2.5. Controlul nedistructiv cu ultrasunete

- **ISO 16810:2012** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General principles
- **ISO 5577:2017** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Vocabulary
- **ISO 18211:2016** Non-destructive testing. Long-range inspection of above-ground pipelines and plant piping using guided wave testing with axial propagation
- **ISO/FDIS 19285** Non-destructive testing of welds – Phased array technique (PAUT) – Acceptance levels
- **ISO 10375:1997** Non-destructive testing – Ultrasonic inspection – Characterisation of search unit and sound field
- **ISO 16823:2012** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Transmission technique
- **ISO/TS 16829** Non-destructive testing – Automated ultrasonic testing – Selection and application of systems
- **ISO 16946:2017** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Specification for step wedge calibration block
- **ISO 2400:2012** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Specification for calibration block No 1
- **ISO 7963:2006** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Specification for calibration block No 2
- **ISO 12710:2002** Non-destructive testing – Ultrasonic inspection – Evaluating electronic characteristics of ultrasonic test instruments
- **ISO 12715:2014** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Reference blocks and test procedures for the characterisation of contact probe sound beams
- **ISO 16831:2012** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Characterisation and verification of ultrasonic thickness measuring equipment
- **ISO 18175:2004** Non-destructive testing – Evaluating performance characteristics of ultrasonic pulse-echo testing systems without the use of electronic measurement instruments
- **ISO 16946:2015** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Specification for step wedge calibration block

- **ISO 18563-1:2015** Non-destructive testing – Characterisation and verification of ultrasonic phased array equipment: Part 1: Instruments
- **ISO 18563-3:2015** Non-destructive testing testing – Characterisation and verification of ultrasonic phased array equipment – Part 3: Combined systems
- **ISO 19675:2017** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Specification for a calibration block for phased array (PAUT)
- **ISO 15626:2011** Non-destructive testing of welds – Time-of-flight diffraction technique (TOFD) – Acceptance levels
- **ISO 16811:2012** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Sensitivity and range setting
- **ISO 16826:2012** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Examination for discontinuities perpendicular to the surface
- **ISO 16827:2012** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Characterisation and sizing of discontinuities
- **ISO 16809:2012** Non-destructive testing – Ultrasonic thickness measurement
- **ISO 4386-1:2012** Plain bearings – Metallic multi-layer plain bearings – Part 1: Non-destructive ultrasonic testing of bond thickness greater than or equal to 0.5 mm
- **ISO 16828:2012** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Time-of-flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities
- **ISO 17405:2014** Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Technique of testing claddings produced by welding, rolling and explosion
- **ISO 10830:2011** Space systems – Non-destructive testing – Automatic ultrasonic inspection method of graphite ingot for solid rocket motors
- **ISO 10863:2011** Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD)
- **ISO 15626:2011** Non-destructive testing of welds – Time-of-flight diffraction technique (TOFD) – Acceptance levels
- **ISO 13588:2012** Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated phased array technology
- **ISO 4992-1:2006** Steel castings – Ultrasonic examination – Part 1: Steel castings for general purposes
- **ISO 4992-2:2006** Steel castings – Ultrasonic examination – Part 2: Steel castings for highly stressed components
- **ISO 17640:2010** Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Techniques, testing levels and assessment
- **ISO 22825:2012** Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Testing of welds in austenitic steels and nickel-based alloys
- **ISO/FDIS 23279** Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Characterization of discontinuities in welds
- **ISO 11666:2010** Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Acceptance levels

- **ISO 10893-8:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 8: Automated ultrasonic testing of seamless and welded steel tubes for the detection of laminar imperfections
- **ISO 10893-9:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 9: Automated ultrasonic testing for the detection of laminar imperfections in strip/plate used for the manufacture of welded steel tubes
- **ISO 10893-10:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 10: Automated full peripheral ultrasonic testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) steel tubes for the detection of longitudinal and/or transverse imperfections
- **ISO 10893-11:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 11: Automated ultrasonic testing of the weld seam of welded steel tubes for the detection of longitudinal and/or transverse imperfections
- **ISO 10893-12:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 12: Automated full peripheral ultrasonic thickness testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) steel tubes
- **ISO 10332:2010** Non-destructive testing of steel tubes – Automated ultrasonic testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) steel tubes for verification of hydraulic leak-tightness

A 2.6. Controlul nedistructiv cu radiații penetrante

- **ISO 5576:1997** Non-destructive testing – Industrial X-ray and gamma ray radiology – Vocabulary
- **ISO 5579:2013** Non-destructive testing – Radiographic testing of metallic materials using film and X- or gamma rays – Basic rules
- **ISO 11699-1:2008** Non-destructive testing – Industrial radiographic film – Part 1: Classification of film systems for industrial radiography
- **ISO 11699-2:1998** Non-destructive testing – Industrial radiographic films – Part 2: Control of film processing by means of reference values
- **ISO 5580:1985** Non-destructive testing – Industrial radiographic illuminators – Minimum requirements
- **ISO 14096-1:2005** Non-destructive testing – Qualification of radiographic film digitisation systems – Part 1: Definitions, quantitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control
- **ISO 14096-2:2005** Non-destructive testing – Qualification of radiographic film digitisation systems – Part 2: Minimum requirements
- **ISO 16526-1:2011** Non-destructive testing – Measurement and evaluation of the X-ray tube voltage – Part 1: Voltage divider method
- **ISO 16526-2:2011** Non-destructive testing – Measurement and evaluation of the X-ray tube voltage – Part 2: Constancy check by the thick filter method
- **ISO 16526-3:2011** Non-destructive testing – Measurement and evaluation of the X-ray tube voltage – Part 3: Spectrometric method

- **ISO 16371-1:2011** Non-destructive testing – Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates – Part 1: Classification of systems
- **ISO 16526-1:2011** Non-destructive testing – Measurement and evaluation of the X-ray tube voltage – Part 1: Voltage divider method
- **ISO 16526-2:2011** Non-destructive testing – Measurement and evaluation of the X-ray tube voltage – Part 2: Constancy check by the thick filter method
- **ISO 16526-3:2011** Non-destructive testing – Measurement and evaluation of the X-ray tube voltage – Part 3: Spectrometric method
- **ISO 19232-1:2013** Non-destructive testing – Image quality of radiographs – Part 1: Determination of the image quality value using wire-type image quality indicators
- **ISO 19232-2:2013** Non-destructive testing – Image quality of radiographs – Part 2: Determination of the image quality value using step/hole-type image quality indicators
- **ISO 19232-3:2013** Non-destructive testing – Image quality of radiographs – Part 3: Image quality classes
- **ISO 19232-4:2013** Non-destructive testing – Image quality of radiographs – Part 4: Experimental evaluation of image quality values and image quality tables
- **ISO 19232-5:2013** Non-destructive testing – Image quality of radiographs – Part 5: Determination of the image unsharpness value using duplex wire-type image quality indicators
- **ISO 16371-1:2011** Non-destructive testing – Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates – Part 1: Classification of systems
- **ISO 15708-1** Non-destructive testing – Radiation methods – Computed tomography – Part 1: Principles, equipment and samples.
- **ISO 15708-2** Non-destructive testing – Radiation methods – Computed tomography – Part 2: Operation and interpretation
- **ISO 15708-3:2017** Non-destructive testing – Radiation methods for computed tomography – Part 3: Operation and interpretation
- **ISO 15708-4:2017** Non-destructive testing – Radiation methods for computed tomography – Part 4: Qualification
- **ISO 4993:2015** Steel and iron castings – Radiographic inspection
- **ISO 10893-7:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 7: Digital radiographic testing of the weld seam of welded steel tubes for the detection of imperfections
- **ISO 17636-1:2013** Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part 1: X- and gamma ray techniques with film
- **ISO 17636-2:2013** Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part 2: X- and gamma ray techniques with digital detectors
- **ISO 10675-1:2008** Non-destructive testing of welds – Acceptance levels for radiographic testing – Part 1: Steel, nickel, titanium and their alloys
- **ISO 10675-2:2010** Non-destructive testing of welds – Acceptance levels for radiographic testing – Part 2: Aluminium and its alloys
- **ISO 10893-6:2011** Non-destructive testing of steel tubes – Part 6: Radiographic testing of the weld seam of welded steel tubes for the detection of imperfections