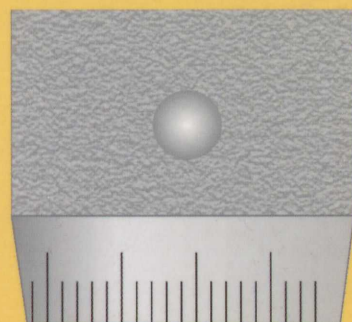
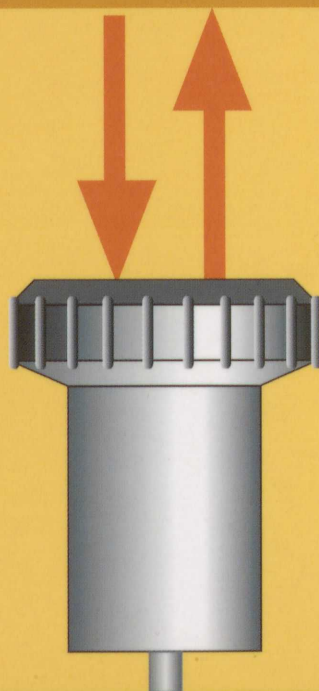


Jolanta Baranowska
Małgorzata Garbiak



BADANIA ULTRADŹWIĘKOWE



POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA



JOLANTA BARANOWSKA
MAŁGORZATA GARBIAK

BADANIA ULTRADŹWIĘKOWE

SZCZECIN 1999

RECENZENT
DOMINIK SENCZYK



W. 127160

OPRACOWANIE REDAKCYJNE
JOLANTA ORKISZ

Biblioteka Główna
Politechniki Szczecińskiej
W. 127160



012-127160-00-0

WYDANO ZA ZGODĄ
REKTORA POLITECHNIKI SZCZECIŃSKIEJ

Wydawnictwo dofinansowane z funduszków
programu TEMPUS S-JEP 07495-94

ISBN 83-87423-55-6

WYDAWNICTWO UCZELNIANE POLITECHNIKI SZCZECIŃSKIEJ
70-310 Szczecin, al. Piastów 17, tel. 449-47-60

Wydanie I. Nakład 200 + 39 egz. Ark. wyd. 5,5. Ark. druku 7,87.
Papier offsetowy kl. III, 80 g, B1.

Druk: „ZAPOL”, 71-062 Szczecin, al. Piastów 42, tel. (091) 434-10-21

J. 670/99

SPIS TREŚCI

ROZDZIAŁ I

FALE ULTRADŹWIĘKOWE	5
1.1. Charakterystyka fal ultradźwiękowych	5
1.1.1. Charakterystyka ruchu falowego	7
1.2. Pole ultradźwiękowe	11
1.3. Zasady rozchodzenia się fal	15
1.3.1. Padanie prostopadłe na granicę ośrodków	15
1.3.2. Padanie ukośne na granicę ośrodków	16
1.4. Kąty krytyczne	18
1.5. Tłumienie wiązki ultradźwiękowej	21

ROZDZIAŁ II

ZASADY BADAŃ ULTRADŹWIĘKOWYCH	33
2.1. Zjawisko piezoelektryczne	33
2.2. Inne metody wysyłania i odbierania ultradźwięków	35
2.2.1. Zjawiska mechaniczne	35
2.2.2. Zjawiska cieplne i techniki laserowe	36
2.2.3. Metody elektrostatyczne	36
2.2.4. Metody elektrodynamiczne	36
2.2.5. Metody magnetostrykcyjne	37
2.3. Techniki pomiarowe	37
2.3.1. Metoda echa	37
2.3.2. Metoda przepuszczania	40
2.3.3. Techniki zanurzeniowe	41

ROZDZIAŁ III

WYPOSAŻENIE DO BADAŃ ULTRADŹWIĘKOWYCH	49
3.1. Głowice	49
3.1.1. Głowica normalna fal podłużnych	52
3.1.2. Głowica skośna fal poprzecznych	52
3.1.3. Głowica podwójna fal podłużnych	54
3.1.4. Głowice fal powierzchniowych	55
3.2. Defektoskopy	55
3.2.1. Defektoskopy analogowe	55
3.2.2. Defektoskopy cyfrowe	60

3.3. Parametry kontrolne aparatury ultradźwiękowej	61
3.3.1. Parametry defektoskopu	61
3.3.2. Parametry głowicy	63
3.3.3. Parametry układu defektoskop-głowica	65
3.4. Rodzaje zobrazowania	67
3.4.1. Zobrazowanie typu A	67
3.4.2. Zobrazowanie typu B	68
3.4.3. Zobrazowanie typu C	69
3.5. Wzorce	70
3.5.1. Wzorzec W1	71
3.5.2. Wzorzec W2	72
3.5.3. Wzorzec mikrosekundowy	73
3.5.4. Inne wzorce	73
3.6. Środki sprzęgające	73
 ROZDZIAŁ IV	
SKALOWANIE	75
4.1. Skalowanie z głowicą normalną	77
4.2. Skalowanie z głowicą podwójną	79
4.3. Skalowanie z głowicą kątową	80
4.4. Lokalizacja reflektorów	82
 ROZDZIAŁ V	
OCENA WIELKOŚCI WADY	87
5.1. Ocena rozmiaru małych wad	87
5.1.1. Reflektory odniesienia	87
5.1.2. Metoda OWR	92
5.1.3. Metoda linii odniesienia	104
5.2. Badanie dużych wad	106
 ROZDZIAŁ VI	
ZASTOSOWANIE BADAŃ ULTRADŹWIEKOWYCH	109
6.1. Badanie złączy spawanych	109
6.2. Odlewy	116
6.3. Ciężkie odkuwki	117
6.4. Tabor kolejowy	118
6.5. Rury i cylindry	118
6.6. Badanie grubości	119
6.7. Badania właściwości materiałowych	121
LITERATURA	123

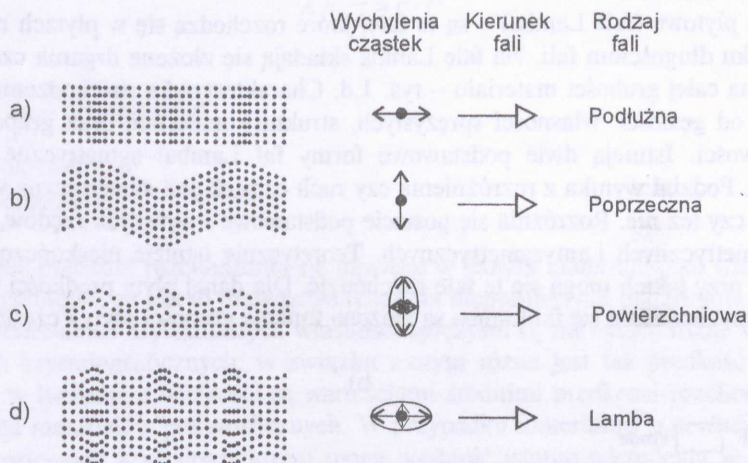
ROZDZIAŁ I

FALE ULTRADŹWIĘKOWE

1.1. Charakterystyka fal ultradźwiękowych

Ultradźwięki są to drgania mechaniczne cząstek ośrodka o częstotliwości powyżej 20 kHz. Rozchodzenie się fali mechanicznej polega na drganiu cząstek w zakresie sprężystym i przekazywaniu części energii sąsiednim cząstkom. Fala dźwiękowa może przemieszczać się więc tylko w ośrodku sprężystym.

Fale ultradźwiękowe różnią się między sobą kierunkiem drgań cząstek ośrodka w stosunku do kierunku rozchodzenia się fali.



Rys. 1. Rodzaje fal

W związku z tym wyróżnia się następujące rodzaje fal:

1. Fale podłużne – cząstki ośrodka drgają prostopadłowo, zgodnie z kierunkiem rozchodzenia się fali – rys.1a. Powoduje to powstawanie obszarów zagęszczeń i rozrzedzeń. Fale te mogą rozchodzić się we wszystkich typach ośrodków, tj. stałym, ciekłym i gazowym. Jedynym warunkiem uzyskania fali podłużnej jest odpowiednio duży stosunek wymiarów ośrodka w stosunku do długości fali. Fale te oznacza się symbolem L , a ich prędkość c_L .

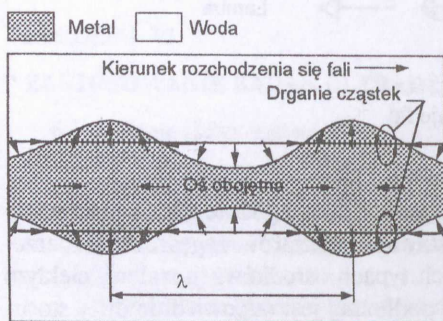
2. Fale poprzeczne – zwane też falami ścinania, są to fale powstające w wyniku drgań cząstek w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali – rys.1b. Fale te mogą występować tylko w ciałach stałych oraz cieczach o dużych lepkościach.

Aby wystąpiło rozprzestrzenianie się fali, cząstki muszą wykazywać silne powiązanie jedna z drugą, umożliwiające wzajemne wymuszanie drgań. Powoduje to też niższą prędkość rozchodzenia się fal poprzecznych (c_T), która stanowi ok. 50% prędkości rozchodzenia się fal podłużnych.

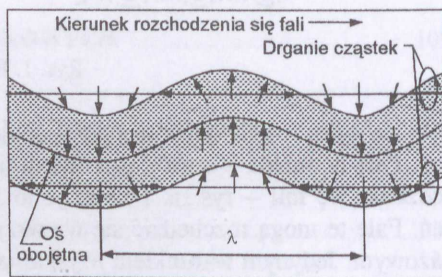
3. Fale powierzchniowe (fale Rayleigh'a) – jest to szczególny przypadek fal poprzecznych. Fale te rozchodzą się wzdłuż płaskich lub zakrzywionych powierzchni stosunkowo grubych elementów. Warunkiem koniecznym propagacji tego typu fal jest ich rozchodzenie na granicy dwóch ośrodków, jednego o bardzo silnych wiązaniach sprężystych (ciało stałe) i drugiego o pomijalnie małych (gaz). W przypadku fal powierzchniowych cząstki drgają po orbicie eliptycznej. Główna oś jest prostopadła do powierzchni rozchodzenia się fali – rys. 1c. Fala ta może rozchodzić się z efektywną energią w obszarze nie grubszym niż jedna długość fali. Fale powierzchniowe nie ulegają tłumieniu jak fale podłużne czy poprzeczne. Prędkość tych fal (c_R) wynosi około $0,9c_T$ dla danego ośrodka. Fala ta przemieszcza się wzdłuż powierzchni i jeżeli np. naroże metalowego bloku jest zaokrąglone, to nie nastąpi jej odbicie, tylko dalsze rozprzestrzenianie. Fale te można wykorzystać do badania elementów o złożonych konturach.

4. Fale płytowe (fale Lamba) – są to fale, które rozchodzą się w płytach o grubości równej kilku długościom fali. Na fale Lamba składają się złożone drgania cząstek występujące na całej grubości materiału – rys. 1.d. Charakterystyka rozchodzenia się tych fal zależy od gęstości, własności sprężystych, struktury materiału oraz grubości płyty i częstotliwości. Istnieją dwie podstawowe formy fal Lamba: symetryczne i antysymetryczne. Podział wynika z rozróżnienia czy ruch cząstek jest symetryczny względem osi próbki czy też nie. Rozróżnia się postacie podstawowe i wyższych rzędów, zarówno dla fal symetrycznych i antysymetrycznych. Teoretycznie istnieje nieskończona liczba prędkości, przy jakich mogą się te fale rozchodzić. Dla danej płyty prędkości charakterystyczne rozchodzenia się fal Lamba są złożoną funkcją grubości płyty i częstotliwości.

a)



b)



Rys. 2. Fale Lamba: a – symetryczne, b – antysymetryczne

W przypadku symetrycznych fal Lamba występuje podłużne przemieszczanie się cząstek wzdłuż osi obojętnej płyty oraz elipsoidalne na każdej powierzchni – rys.2a.

Natomiast dla antysymetrycznych fal występuje poprzeczne przemieszczanie się cząstek wzdłuż osi obojętnej płyty oraz eliptyczne na każdej powierzchni – rys.2b. W obu przypadkach stosunek większej osi do mniejszej jest funkcją materiału, w którym rozchodzi się fala, lub grubości płyty.

1.1.1. Charakterystyka ruchu falowego

Analizując ruch falowy w ośrodku sprężystym można zauważyć, że w danej chwili niektóre cząstki znajdują się w tej samej fazie ruchu drgającego. Odległość między najbliższymi cząstkami pozostającymi w tej samej fazie nazywamy długością fali λ .

Ruch drgający wykonywany przez cząstki materii scharakteryzowany jest przez częstotliwość f , tj. liczbę drgań cząstek na sekundę.

Fala dźwiękowa rozchodzi się z pewną prędkością zwaną prędkością dźwięku, jest ona charakterystyczna dla danego materiału i na ogół stała.

Jeżeli fala rozchodzi się w materiale z prędkością c , to obowiązuje zależność

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T$$

gdzie:

$$f = \frac{1}{T} - \text{częstotliwość,}$$

T – okres drgań,

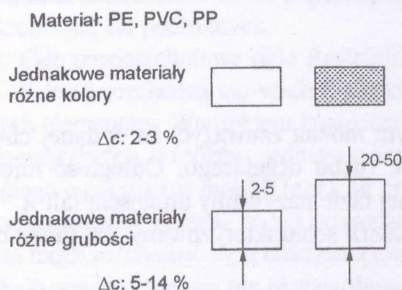
λ – długość fali.

Traktując prędkość rozchodzenia się dźwięku w danym materiale jako wielkość stałą, należy pamiętać, że jest to prawdziwe tylko dla nieporowatych materiałów amorficznych. W materiałach krystalicznych własności sprężyste są zazwyczaj różne w różnych kierunkach krystalograficznych, w związku z czym różna jest też prędkość dźwięku. Podawane w literaturze wielkości są wartościami średnimi prędkości rozchodzenia się dźwięku dla materiałów polimorficznych. W przypadku materiałów o pewnej uprzywilejowanej orientacji krystalograficznej mogą wystąpić istotne odchylenia w prędkości dźwięku w różnych kierunkach.

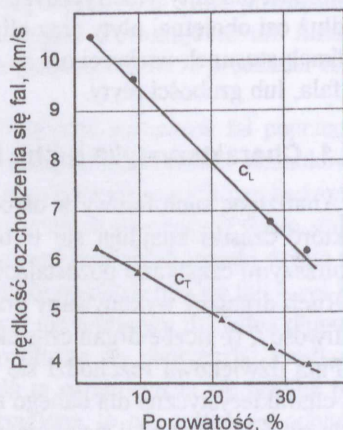
W materiałach heterogenicznych prędkość dźwięku zazwyczaj maleje na skutek obecności wtrąceń drugiej fazy i zanieczyszczeń. Podobne zjawisko występuje w przypadku obecności por, np. w porcelanie, gdzie miarą porowatości może być obniżenie prędkości dźwięku. Zmiany prędkości powoduje również obecność barwników w tworzywach sztucznych (rys.3), pęcherze w metalach i ceramice (rys.4), anizotropia materiału itp.

Zmiany prędkości dźwięku wykorzystuje się do pomiaru naprężeń zewnętrznych jak i wewnętrznych.

Wpływ temperatury na prędkość rozchodzenia się dźwięku jest dla ciał stałych praktycznie pomijalny, może natomiast odgrywać pewną rolę w przypadku bardzo dokładnych pomiarów w cieczach i tworzywach sztucznych (rys. 5).



Rys. 3. Wpływ barwy i grubości na prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w tworzywach



Rys. 4. Zmiana prędkości fal podłużnych i poprzecznych dla różnej porowatości w Al_2O_3

Prędkość fal podłużnych w ciele stałym w ośrodku nieograniczonym przedstawia zależność

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

gdzie:

- E – moduł Younga,
- ρ – gęstość,
- ν – współczynnik Poissona.

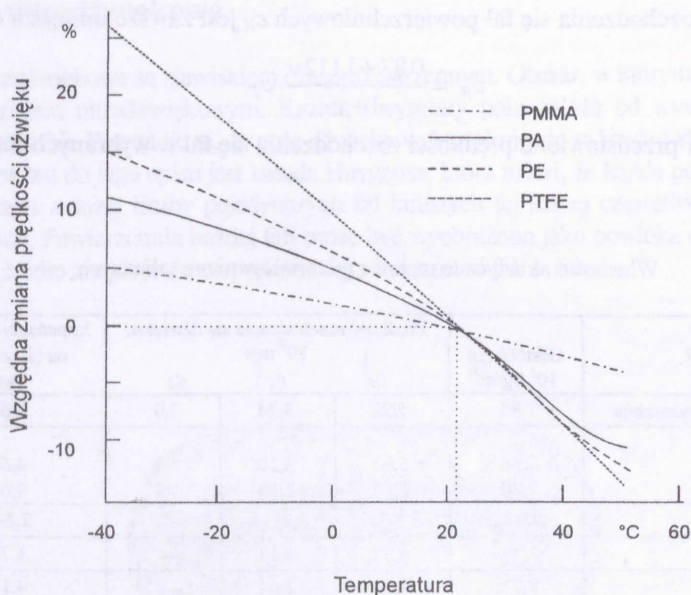
W ośrodku, którego jeden lub dwa wymiary a i b prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali są ograniczone, prędkość rozchodzenia się fali podłużnej wyraża się wzorem:

a) płyta $a \gg \lambda$, $b \ll \lambda$

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$$

b) pręt $a \ll \lambda$, $b \ll \lambda$

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$



Rys. 5. Wpływ temperatury na prędkość rozchodzenia się fal dźwiękowych w tworzywach sztucznych

W cieczech i gazach prędkość fal podłużnych wynosi:

$$c_L = \sqrt{\frac{1}{\rho \beta_{ad}}}$$

gdzie:

β_{ad} – adiabatyczny współczynnik ściśliwości ośrodka.

Prędkość fal poprzecznych w ciałach stałych przedstawia zależność

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

wynikająca z równania:

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

gdzie:

G – moduł sprężystości poprzecznej.

Stosunek c_T/c_L zależy tylko od liczby Poissona:

$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}$$

Prędkość rozchodzenia się fal powierzchniowych c_R jest zawsze mniejsza od c_T

$$c_R \approx \frac{0,87 + 1,112\nu}{1 + \nu} \cdot c_T$$

W tablicy 1 przedstawiono prędkości rozchodzenia się fal w wybranych materiałach.

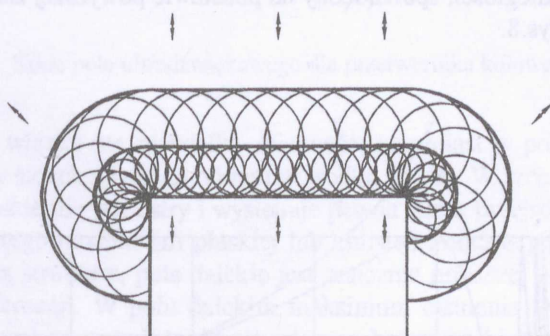
Tablica 1

Własności akustyczne metali i materiałów niemetalicznych

Materiał	Gęstość (ρ) 10 ³ kg/m ³	Prędkość rozchodzenia się dźwięku, 10 ³ m/s			Impedancja akustyczna ($Z=\rho \cdot c_L$) 10 ⁻⁵ Pa·s/m
		c_L	c_T	c_R	
Stal węglowa; wyżarzona	7,85	5,92	3,24	3,0	4,66
Stal stopowa: wyżarzona	7,86	5,95	3,26	3,0	4,68
	7,80	5,90	3,23	—	4,60
Żeliwo szare	6,95-7,35	3,5-5,6	2,2-3,2	—	2,5-4,0
Aluminium	2,7	6,32	3,13	—	1,71
Miedź	8,9	4,7	2,64	—	4,18
Mosiądz	8,10	4,43	2,20	—	3,59
Ołów czysty	11,34	2,16	0,70	0,64	2,45
utwardzony (94 Pb-6Sb)	10,88	2,16	0,81	0,73	—
Nikiel czysty	8,80	5,63	2,96	2,64	4,95
Inconel	8,50	5,82	3,02	2,79	4,95
Monel	8,83	5,35	2,72	2,46	4,72
Tytan	4,50	6,10	3,12	2,79	2,75
Wolfram	19,25	5,18	2,87	2,65	9,98
Powietrze	0,00129	0,331	—	—	0,00004
Glikol etylenowy	1,11	1,66	—	—	0,18
Szkło	2,50	5,77	3,43	3,14	1,44
Gliceryna	1,26	1,92	—	—	0,24
Olej maszynowy	0,87	1,74	—	—	0,15
Olej transformatorowy	0,92	1,38	—	—	0,127
Parafina	0,90	2,20	—	—	0,20
Plexiglas (PMM)	1,18	2,67	1,12	1,13	0,32
Poliamid (nylon)	1,0-1,2	1,8-2,2	—	—	0,18-0,27
Teflon	2,20	1,35	—	—	0,30
Kwarc naturalny	2,65	5,73	—	—	1,52
Guma twarda	1,1-1,6	2,30	—	—	0,25-0,37
Guma miękka	0,9	1,48	—	—	0,13
Węglik wolframu	10-15	6,66	3,98	—	6,7-9,9
Woda	1,00	1,49	—	—	0,149
Lód	0,90	3,98	1,99	—	0,36

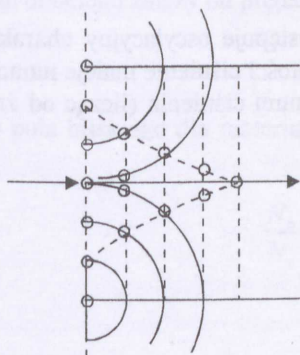
1.2. Pole ultradźwiękowe

Fale ultradźwiękowe są zjawiskiem czasoprzestrzennym. Obszar, w którym się rozchodzą nazywamy polem ultradźwiękowym. Kształt i wymiary pola zależą od wymiarów źródła i częstotliwości fali. Powoduje to, że pole dźwiękowe kształtuje się w bardzo skomplikowany sposób. Podstawą do jego opisu jest zasada Huygensa, która mówi, że każda postać fali może być zbudowana z dużej liczby pojedynczych fal kulistych tej samej częstotliwości, tzw. fal elementarnych. Powierzchnia każdej fali może być wyobrażona jako powłoka elementarnych fal, których źródło znajduje się na poprzedniej powierzchni fali – rys. 6.



Rys. 6. Konstrukcja fali płaskiej jako obwiedni fal kulistych wypromieniowanych przez źródła punktowe wg zasady Huygensa

Ciśnienia poszczególnych fal kulistych mogą się w różnych punktach dodawać lub odejmować. W konsekwencji powstają lokalne maksima i minima ciśnienia – rys. 7.



Rys. 7. Budowa interferencyjna pola dźwięku zgodnie z zasadą Huygensa

Taka konstrukcja jak na rysunku daje dokładną pozycję maksimów i minimów tylko w przypadku długich wąskich szczelin, prostopadłych do płaszczyzny rysunku, ale nie w przypadku okrągłej diafragmy.

Ciśnienie akustyczne w funkcji odległości od źródła l dla różnych punktów pola dźwięku przedstawia zależność:

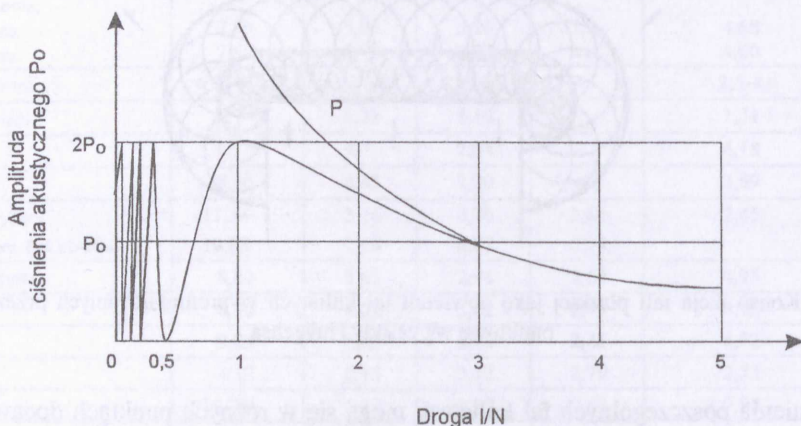
$$P = P_0 2 \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{D^2}{4} + l^2} - l \right) \right]$$

gdzie:

D – średnica przetwornika,

l – odległość od powierzchni źródła.

Wykres zależności amplitudy względnego ciśnienia akustycznego w osi źródła kołowego w funkcji odległości, sporządzony na podstawie powyższej zależności dla $P_0 = 1$, przedstawiono na rys.8.



Rys.8. Rozkład względnego ciśnienia akustycznego w osi źródła kołowego

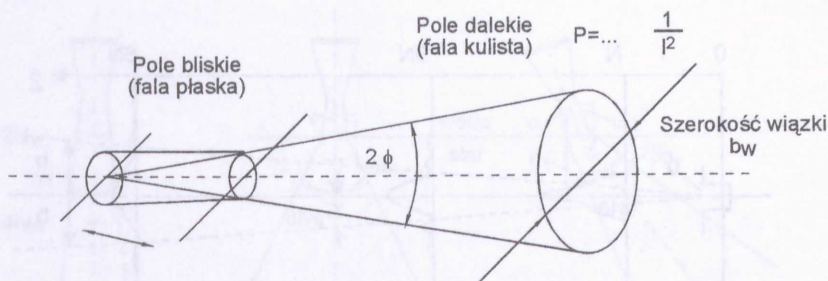
Z rysunku wynika, że dla odległości $l < N$ występuje oscylacyjny charakter zmian amplitudy ciśnienia akustycznego. Powyżej tej wartości ciśnienie maleje monotonicznie. Odległość N , dla której występuje ostatnie maksimum ciśnienia (licząc od źródła), nazywamy długością pola bliskiego (strefa Fresnela).

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda}$$

dla $D \gg \lambda$

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

Szkic pola ultradźwiękowego w przestrzeni, tzw. profil wiązki, przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Szkic pola ultradźwiękowego dla przetwornika kołowego

W polu bliskim wiązka ma niewielką zbieżność, natomiast w polu dalekim (strefa Fraunhofera) tworzy stożek z wierzchołkiem w środku źródła. W rzeczywistości podział na pole bliskie i dalekie nie jest ostry i występuje pewna strefa przejściowa, w której nie można przyjąć czystego modelu fali płaskiej lub kulistej. Podczas gdy pole bliskie ma dość skomplikowaną strukturę, pole dalekie jest znacznie prostsze, gdyż nie występują tam zjawiska interferencji. W polu dalekim maksimum ciśnienia leży na osi wiązki, a sąsiadujące minima leżą w położeniu określonym kątem rozbieżności wiązki (kropkowane linie na rys.10).

Przy przechodzeniu dźwięku przez granicę dwóch różnych materiałów istotna jest znajomość zachowania się pola bliskiego i dalekiego.

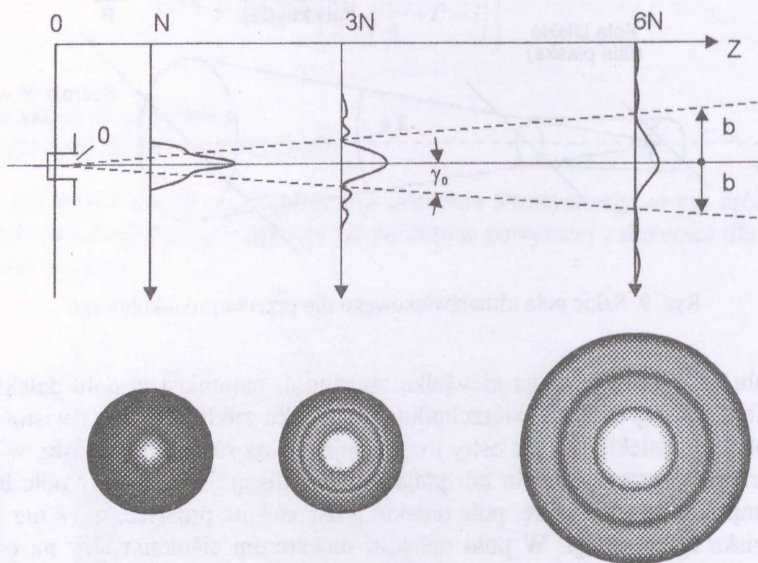
Przykładem może być badanie metodą immersyjną, gdzie dźwięk przechodzi najpierw przez ciecz (najczęściej wodę) zanim wejdzie do próbki. Na rys.11 przedstawiono, co dzieje się na granicy woda/stal, gdy nie zachodzi transformacja fali.

Im mniejsza prędkość rozchodzenia się dźwięku, tym węższe jest pole dźwięku. Długość pola bliskiego zależy od prędkości dźwięku:

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4c}$$

Długość pola bliskiego dla materiału innego niż stal można przeliczyć z poniższej zależności:

$$\frac{N_n}{N_s} = \frac{D_{ef}^2 \cdot f \cdot 4c_s}{4c_n \cdot D_{ef}^2 \cdot f}$$



Rys. 10. Przejście od pola bliskiego do dalekiego i ciśnienia akustyczne na przekrojach wiązki w odległościach: N, 3N i 6N

stąd:

$$N_n = N_s \frac{c_s}{c_n}$$

gdzie:

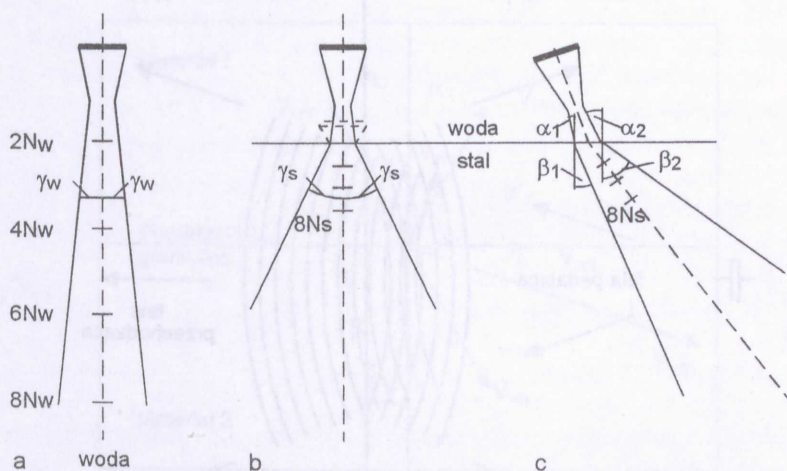
N_s, N_n – długości pola bliskiego w stali i w nieznanym materiale

c_s, c_n – prędkości rozchodzenia się dźwięku w stali i materiale nieznanym.

Poszczególne odcinki pola dźwięku ulegają modyfikacji odwrotnie proporcjonalnie do prędkości dźwięku. Pole dźwięku w stali jest 4 razy krótsze niż w wodzie, gdyż:

$$c(\text{woda})/c(\text{stal}) = 1480/5920 = 1/4$$

Jeżeli przy załamaniu na granicy ośrodków występuje transformacja fali np. podłużnej na poprzeczną, charakterystyka pola dźwięku w ciele stałym wynika już z prędkości fal poprzecznych.



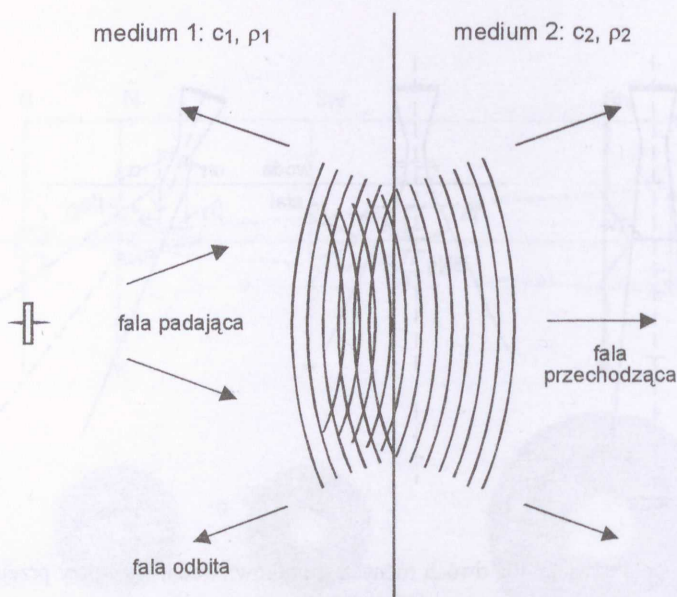
Rys. 11. Zmiana pola dźwięku dla dwóch różnych ośrodków (woda, stal) przy przejściu fali bez transformacji

1.3. Zasady rozchodzenia się fal

Analiza fal w ośrodkach nieskończenie dużych jest możliwa tylko teoretycznie, ponieważ w praktyce każda substancja ma granice, na których rozchodzenie się fali jest zaburzone. Jeżeli materiał graniczy z próżnią, żadna fala nie może przechodzić dalej. Zatem na takiej granicy swobodnej fala ulegnie odbiciu, w przypadku gładkiej powierzchni lub rozproszeniu w przypadku powierzchni chropowatej. Jeżeli do powierzchni granicznej przylega drugi materiał, fala może do niego przechodzić, jednak zmiana może ulec kierunek jej przemieszczania się lub intensywność wiązki, może także ulegać transformacji, gdy jeden z ośrodków jest zdolny przenosić naprężenia styczne.

1.3.1. Padanie prostopadłe na granicę ośrodków

W przypadku gdy fala ultradźwiękowa pada pod kątem prostym na powierzchnię graniczną dwóch materiałów (kąt padania = 0°), występuje przechodzenie i odbicie fali na granicy bez żadnych zmian kierunku wiązki (rys.12).



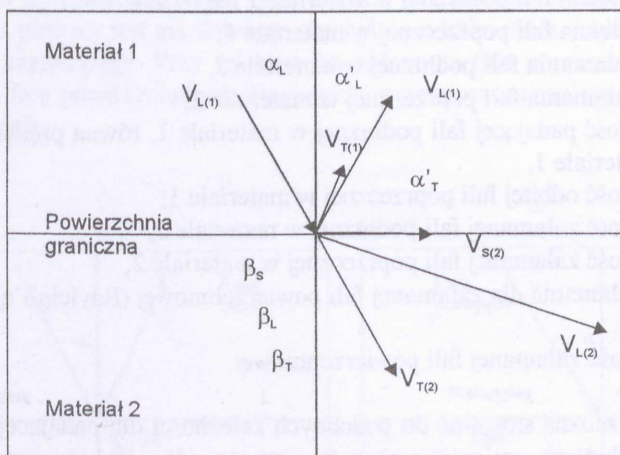
Rys. 12. Padanie prostopadłe na powierzchnię graniczną dwóch różnych materiałów

1.3.2. Padanie ukośne na granicę ośrodków

Jeżeli płaska fala dźwiękowa pada na granicę ośrodków pod kątem padania α , to podobnie jak w optyce powstaje fala odbita i przechodząca. Fale przechodzące nazywane są również falami załamanymi, ponieważ kierunek ich rozchodzenia zmienia się w stosunku do kierunku fali padającej.

Przy każdym kącie padania różnym od 0° trzeba brać pod uwagę zjawisko transformacji (zmiana modu – zmiana natury ruchu fali) i załamania fali (zmiana kierunku rozchodzenia się fali). Zjawiska te mogą wpływać na całą lub część wiązki, a całkowita suma zmian, które zachodzą na granicy ośrodków, zależy od kąta padania i prędkości fal ultradźwiękowych. Wszystkie możliwe fale dźwiękowe wychodzące z punktu padania fal podłużnych pokazano na rysunku 13.

Nie wszystkie fale pokazane na rysunku 13 powstaną w każdym przypadku padania ukośnego fali na granicę dwóch ośrodków. Fale, które przechodzą w danej chwili zależą od tego czy dany rodzaj fali może istnieć w drugim ośrodku oraz od kąta padania wiązki początkowej i prędkości fal w obu materiałach.



Rys. 13. Przedstawienie wszystkich możliwych fal powstających przy padaniu fali podłużnej pod kątem α_i na granicę dwóch różnych ośrodków

Ogólne prawo opisujące zachowanie się fal na granicach ośrodków nazywa się prawem Snelliusa. Prawo to zostało pierwotnie opracowane dla fal świetlnych, ale ma zastosowanie zarówno do fal dźwiękowych (w tym ultradźwiękowych), jak i wielu innych rodzajów fal. Zgodnie z tym prawem stosunek sinusa kąta padania fali do sinusa kąta odbicia lub załamania jest równy stosunkowi odpowiednich prędkości fal.

Prawo Snelliusa ma zastosowanie nawet w przypadku, gdy zachodzi zjawisko transformacji fali. Matematycznie można je przedstawić następująco:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

gdzie:

- α – kąt padania,
- β – kąt odbicia lub załamania,
- c_1 – prędkość fali padającej,
- c_2 – prędkość fali odbitej lub załamanej.

Poniżej przedstawiono równanie, które uwzględnia wszystkie możliwe efekty transformacji przy ukośnym padaniu fali podłużnej (rys. 13)

$$\frac{\sin \alpha_L}{c_{L(1)}} = \frac{\sin \alpha'_L}{c_{L(1)}} = \frac{\sin \alpha'_T}{c_{T(1)}} = \frac{\sin \beta_L}{c_{L(2)}} = \frac{\sin \beta_T}{c_{T(2)}}$$

gdzie:

- α_L – kąt padania fali podłużnej w materiale 1,
- α_L' – kąt odbicia fali podłużnej w materiale 1 [$\alpha_L' = \alpha_L$],
- α_T' – kąt odbicia fali poprzecznej w materiale 1,
- β_L – kąt załamania fali podłużnej w materiale 2,
- β_T – kąt załamania fali poprzecznej w materiale 2,
- $c_{L(1)}$ – prędkość padającej fali podłużnej w materiale 1, równa prędkości odbitej fali podłużnej w materiale 1,
- $c_{T(1)}$ – prędkość odbitej fali poprzecznej w materiale 1,
- $c_{L(2)}$ – prędkość załamanej fali podłużnej w materiale 2,
- $c_{T(2)}$ – prędkość załamanej fali poprzecznej w materiale 2,
- β_S – kąt załamania dla załamanej fali powierzchniowej (Rayleigh'a) w materiale 2 równy 90° ,
- $c_{S(2)}$ – prędkość załamanej fali powierzchniowej.

Równanie to można stosować do podobnych zależności dla padającej fali poprzecznej (zamiast podłużnej), zmieniając $\sin \alpha_L / c_{L(1)}$ na $\sin \alpha_T / c_{T(1)}$ w pierwszym członie równania.

1.4. Kąty krytyczne

Jeżeli kąt padania jest mały, fale dźwiękowe rozchodzące się w danym ośrodku mogą podlegać transformacji na granicy ośrodka, powodując jednoczesną propagację fal podłużnych i poprzecznych w drugim ośrodku. Jeżeli kąt wzrasta, kierunek załamanej fali podłużnej będzie się zbliżał do płaszczyzny granicznej ($\beta_L \rightarrow 90^\circ$). Przy pewnej określonej wartości α_L , β_L będzie dokładnie równe 90° (rys. 14a). Ta wartość kąta α_L nazywana jest *pierwszym kątem krytycznym*. Powyżej tej wartości α_L fala podłużna nie będzie już propagować w materiale. Powstanie tylko załamana fala poprzeczna, rozchodząca się w drugim ośrodku (rys. 14b).

Jeżeli kąt α_L zostanie zwiększony powyżej wartości pierwszego kąta krytycznego, kierunek odbitej fali poprzecznej będzie się zbliżał do płaszczyzny granicznej ośrodków ($\beta_T \rightarrow 90^\circ$). Wartość α_L , przy której β_T będzie równe dokładnie 90° , nazywa się *drugim kątem krytycznym* (rys. 14c). Powyżej wartości α_L odbita fala poprzeczna nie będzie dłużej propagować w materiale.

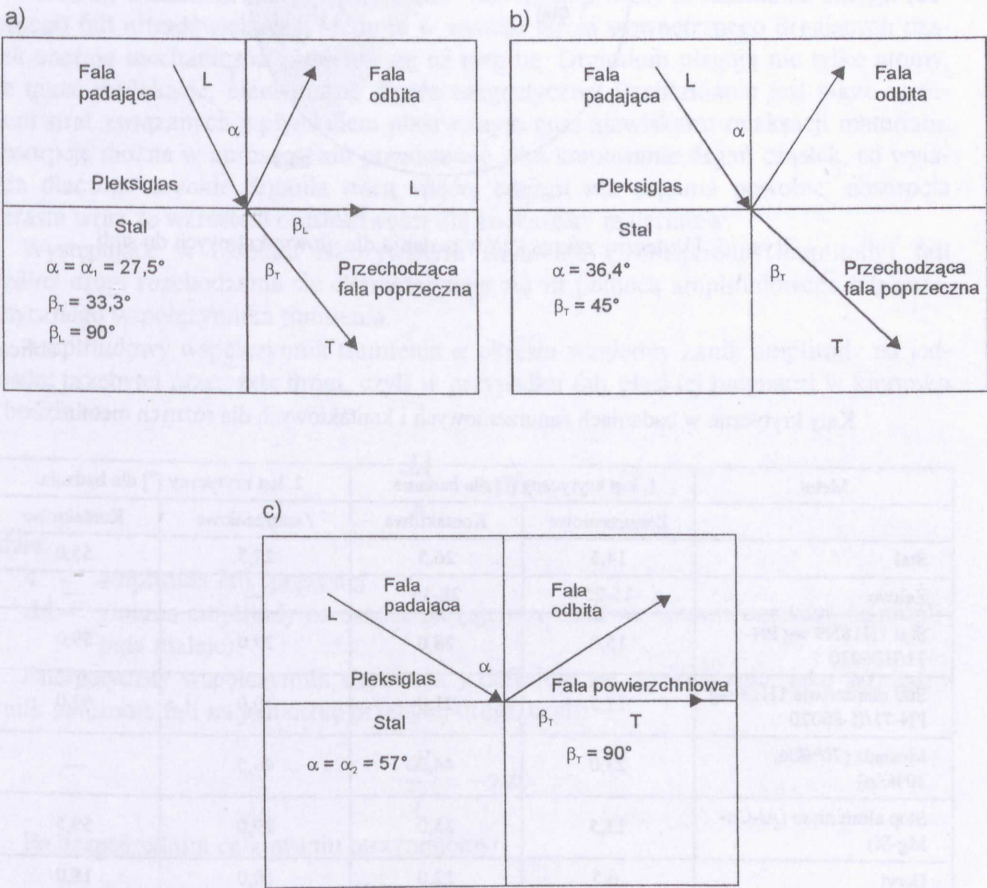
Kąty krytyczne są szczególnie ważne w badaniach ultradźwiękowych. Wartości kątów padania α_L zawarte pomiędzy 1. a 2. kątem krytycznym mają największe znaczenie w badaniach głowicami kątowymi (rys. 15).

Wartości kątów krytycznych dla niektórych materiałów podano w tablicy 2.

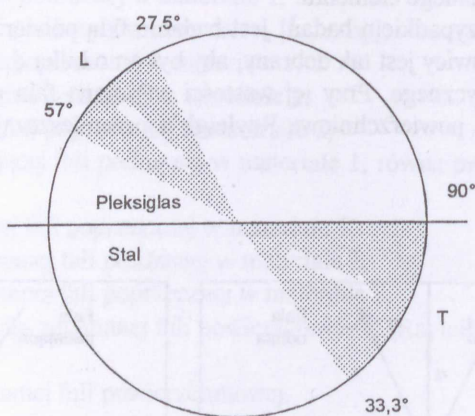
W standardowym badaniu kątowym pożądane jest, aby mieć tylko falę poprzeczną rozchodzącą się w badanym materiale. Ponieważ fale podłużne i poprzeczne rozchodzą się z różnymi prędkościami, sygnały echa będą rejestrowane w różnym czasie zależnie od tego, który rodzaj fali je wytworzył. Kiedy oba typy fal są obecne w badanym mate-

riale, na ekranie powstaje złożony obraz, co może prowadzić do błędnych interpretacji na temat jakości badanego elementu.

Szczególnym przypadkiem badań jest badanie falą powierzchniową. W badaniach tych kąt padania głowicy jest tak dobrany, aby był on o kilka dziesiątych stopnia większy od 2. kąta krytycznego. Przy tej wartości załamana fala poprzeczna w materiale zamienia się w falę powierzchniową Rayleigh’a przemieszczając się po powierzchni badanego materiału.



Rys. 14. Wpływ kąta padania fali a na rozchodzenie się fal ugiętych: a – $\alpha = \alpha_1$ – pierwszy kąt krytyczny, b – $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$, c – $\alpha = \alpha_2$ – drugi kąt krytyczny



Rys. 15. Użyteczny zakres kątów padania dla głowic kątowych do stali

Tablica 2

Kąty krytyczne w badaniach zanurzeniowych i kontaktowych dla różnych metali

Metal	1. kąt krytyczny [°] dla badania:		2. kąt krytyczny [°] dla badania:	
	Zanurzeniowe	Kontaktowe	Zanurzeniowe	Kontaktowe
Stal	14,5	26,5	27,5	55,0
Żeliwo	15-25	28-50	—	—
Stal 1H18N9 wg PN-71/H86020	15,0	28,0	29,0	59,0
Stal nierdzewna 1H13 wg PN-71/H-86020	11,5	21,0	30,0	63,0
Mosiądz (70%Cu, 30%Zn)	23,0	44,0	46,5	—
Stop aluminium (Al-Cu-Mg-Si)	13,5	25,0	29,0	59,5
Beryl	6,5	12,0	10,0	18,0
Inconel (stop o składzie 80%Ni-14%Cr-6%Fe)	23,0	44,0	46,5	—
Stop magnezu M1A	15,0	27,5	29,0	59,5
Monel	16,5	30,0	33,0	79,0
Tytan	14,0	26,0	29,0	59,0
Uwaga: Badania zanurzeniowe w wodzie o temp. 4°C				

1.5. Tłumienie wiązki ultradźwiękowej

Intensywność wiązki ultradźwiękowej docierającej do odbiornika jest znacznie mniejsza niż intensywność wiązki wysyłanej przez nadajnik. Czynniki odpowiedzialne za straty intensywności wiązki można podzielić na 3 grupy:

- 1) straty transmisji (absorpcja, rozpraszanie, efekty impedancji akustycznej),
- 2) efekty interferencji (dyfrakcja, przesunięcie fazowe lub zmiana częstotliwości),
- 3) rozbieżność wiązki w polu dalekim.

Na straty transmisji składają się przede wszystkim procesy pochłaniania energii (absorpcja) fali ultradźwiękowej, kiedy to w wyniku tarcia wewnętrznego drgających cząstek energia mechaniczna zamienia się na ciepłą. Drganiom ulegają nie tylko atomy, ale także dyslokacje, elementarne dipole magnetyczne. Pochłanianie jest także wynikiem strat związanych z płynięciem plastycznym oraz zjawiskami relaksacji materiału. Absorpcję można w uproszczeniu przedstawić jako hamowanie drgań cząstek, co wyjaśnia dlaczego szybkie drgania tracą więcej energii niż drgania powolne; absorpcja wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości dla większości materiałów.

Występujące w ośrodku rzeczywistym tłumienie (zmniejszenie amplitudy) fali wzdłuż drogi rozchodzenia się charakteryzuje się za pomocą amplitudowego lub energetycznego współczynnika tłumienia.

Amplitudowy współczynnik tłumienia α określa względny zanik amplitudy na jednostkę przebytej przez falę drogi, czyli w przypadku fali płaskiej biegnącej w kierunku x będzie to:

$$\frac{dA}{A} = -\alpha dx$$

gdzie:

A – amplituda fali sprężystej

dA – zmiana amplitudy na drodze dx (ujemny znak we wzorze oznacza, że amplituda maleje).

Energetyczny współczynnik tłumienia γ definiuje się analogicznie, jako względny zanik natężenia fali na jednostkę przebytej drogi, czyli:

$$\frac{dI}{I} = -\gamma dx$$

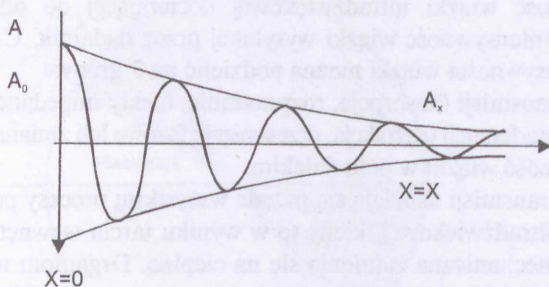
Po bezpośrednim całkowaniu otrzymujemy:

$$A = A_0 \exp(-\alpha x)$$

$$I = I_0 \exp(-\gamma x)$$

gdzie:

A_0 i I_0 – odpowiednio początkowe wartości amplitudy i natężenia dla $x = x_0$, a więc dla punktu, od którego rozpoczynamy obserwację (rys. 16).



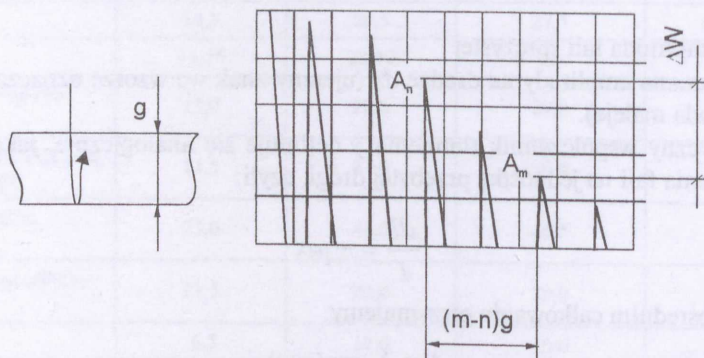
Rys. 16. Zmiana amplitudy fali w wyniku tłumienia

Tłumienie fal jest wielkością charakterystyczną danego ośrodka (podobnie jak prędkość rozchodzenia się dźwięku) i jest przedmiotem bezpośredniego pomiaru.

Do wyznaczania współczynnika tłumienia stosuje się zarówno metodę pomiaru zmian amplitudy jak i zmian natężenia fali rozchodzącej się w danym ośrodku.

Przykład:

W przypadku pomiaru w polu bliskim można zaniedbać poprawkę wynikającą z rozbieżności wiązki. Przy badaniu próbki o grubości g otrzymuje się na defektoskopie ciąg kolejnych ech dna jak na rys. 17



Rys. 17. Pomiar współczynnika tłumienia fal podłużnych w polu bliskim z użyciem jednej próbki

Współczynnik tłumienia można obliczyć ze wzoru:

$$\alpha = \frac{1}{2(m-n)g} 20 \log \frac{A_n}{A_m} = \frac{1}{2(m-n)g} \Delta W$$

gdzie:

$A_n, A_{m,n}$ – odp. amplitudy n i m -tego echa dna,

ΔW – różnica wzmoceń [dB], przy której echa n i m osiągają na ekranie te same wysokości.

W przypadku pomiaru w polu dalekim, współczynnik tłumienia można wyznaczyć na podstawie dwóch kolejnych ech n i $n+1$ ze wzoru:

$$\alpha = \frac{1}{2g} 20 \log \left(\frac{A_n}{A_{n+1}} \cdot \frac{\chi_{n+1}}{\chi_n} \right)$$

gdzie:

χ_n, χ_{n+1} – współczynnik korekcyjny wyrażający spadek poziomu sygnału ech, wywołany rozbieżnością wiązki fal, dla dwóch kolejnych ech (przykładowe współczynniki podano w tablicy 3).

$$\chi = P/P_0 = f(n \cdot g/N)$$

Rozpraszanie fali ultradźwiękowej ma miejsce dlatego, że większość materiałów nie jest w rzeczywistości jednorodna. Nieciągłości struktury takie jak granice ziaren, bliźniaki, drobne wtrącenia niemetaliczne, pory prowadzą do odchylenia małych porcji energii ultradźwiękowej od głównej wiązki. Dodatkowo, szczególnie przy mieszanych mikrostrukturach lub w materiałach izotropowych zachodzi tendencja do transformacji fali na granicach krystalitów z powodu nieznacznych różnic prędkości i impedancji akustycznych.

Rozpraszanie zależy w znacznym stopniu od relacji pomiędzy rozmiarem krystalitu (przede wszystkim rozmiarem ziarna) a długością fali ultradźwiękowej. Jeżeli ziarno jest mniejsze od 0,01 długości fali, to rozpraszanie jest pomijalnie małe. Wzrasta ono bardzo szybko wraz z trzecią potęgą wielkości ziarna i jest zauważalne przy wielkości ziarna powyżej 0,1 długości fali, kiedy to nadmierne rozpraszanie może uniemożliwić prawidłowe badania ultradźwiękowe. W niektórych przypadkach określenie stopnia rozproszenia można wykorzystać jako podstawę oceny badanego elementu, tzn. jego przyjęcia lub odrzucenia. Niektóre żeliwa można badać pod kątem wielkości i rozkładu grafitu płatkowego. Podobnie można określić rozmiar i rozkład mikroskopijnych pustek w elementach wytwarzanych metodą metalurgii proszkowej lub faz wzmacniających w materiałach utwardzanych wydzieleniowo lub kompozytach przez pomiar tłumienia (rozpraszania) wiązki ultradźwiękowej.

Kiedy fala ultradźwiękowa przechodząc przez jeden ośrodek pada na granicę z drugim ośrodkiem, część padającej energii akustycznej jest odbijana z powrotem, a pozostała część przechodzi do drugiego ośrodka. Wielkością, która wpływa na stopień odbicia, jest impedancja akustyczna materiałów po obu stronach powierzchni granicznej. Jeżeli impedancje obu materiałów są równe, nie będzie odbicia, jeżeli różnią się znacznie (jak np. metal/powietrze), wystąpi praktycznie całkowite odbicie. Impedancja akustyczna jest wykorzystywana w badaniach ultradźwiękowych metali do obliczania ilości energii odbitej i przechodzącej przez nieciągłości oraz aby wspomóc dobór odpo-

wiednich materiałów do efektywnego przenoszenia energii akustycznej pomiędzy elementami w urządzeniach do badań ultradźwiękowych

Tablica 3

Współczynnik korekcyjny χ w funkcji odległości unormowanej $n \cdot g/N$ dla sondy kołowej o średnicy względnej $3 < D/\lambda < 300$

$n \cdot g/N$	χ	$n \cdot g/N$	χ	$n \cdot g/N$	χ
0,1	0,93	3,35	0,71	11	0,28
0,2	0,91	3,50	0,69	12	0,26
0,3	0,88	3,75	0,66	13	0,24
0,4	0,87	4,00	0,64	14	0,22
0,5	0,86	4,25	0,62	15	0,20
0,6	0,84	4,50	0,59	16	0,19
0,7	0,83	4,75	0,57	17	0,18
0,8	0,81	5,00	0,55	18	0,17
0,9	0,81	5,25	0,53	19	0,16
1,0	0,81	5,50	0,51	20	0,16
1,1	0,80	5,75	0,49	21	0,15
1,2	0,79	6,00	0,48	22	0,14
1,3	0,77	6,25	0,46	24	0,13
1,4	0,75	6,50	0,45	26	0,12
1,5	0,74	6,75	0,43	30	0,10
1,6	0,74	7,00	0,42	32	0,093
1,7	0,74	7,25	0,41	34	0,092
1,8	0,75	7,50	0,40	36	0,087
1,9	0,75	7,75	0,38	38	0,083
2,0	0,76	8,00	0,37	40	0,078
2,1	0,76	8,25	0,36	45	0,070
2,2	0,76	8,50	0,35	50	0,063
2,3	0,76	8,75	0,34	55	0,057
2,4	0,76	9,00	0,34	60	0,052
2,5	0,76	9,25	0,33	65	0,048
2,6	0,76	9,50	0,32	70	0,045
2,7	0,75	9,75	0,31	75	0,042
2,8	0,75	10,00	0,30	80	0,039
2,9	0,74			90	0,035
3,0	0,73			100	0,031

Impedancja akustyczna dla fali podłużnej z [Pa·s/m] jest definiowana jako iloczyn gęstości materiału ρ [kg/m³] i prędkości fali podłużnej c_1 [m/s]: $z = \rho \cdot c$.

Dwa graniczące ośrodki 1 i 2 są różne, jeżeli prędkość fal w tych ośrodkach jest różna ($c_1 \neq c_2$) lub impedancje falowe (oporności akustyczne) są różne ($Z_1 \neq Z_2$). Rozważmy prosty przypadek fali płaskiej padającej prostopadłe na płaską i gładką granicę dwóch ośrodków.

Jeżeli fala ultradźwiękowa o ciśnieniu P pada na granicę dwóch ośrodków 1 i 2 o akustycznych opornościach falowych $Z_1 = \rho_1 \cdot c_1$ i $Z_2 = \rho_2 \cdot c_2$, to część fali odbija się z ciśnieniem akustycznym P_1 do ośrodka 1, a część z ciśnieniem P_2 przenika do ośrodka

2. Zależność między ciśnieniem fali odbitej a przechodzącej w stosunku do ciśnienia fali padającej określają ciśnieniowy (amplitudowy) współczynnik odbicia R_p i przenikania D_p :

$$R_p = \frac{P_1}{P} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{1 - m}{1 + m} \quad \text{gdzie: } m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}$$

$$D_p = \frac{P_2}{P} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2}{1 + m} \quad \text{gdzie: } D_p = 1 + R_p$$

Przy odbiciu od granicy ośrodków występują dwa przypadki. W pierwszym z nich akustyczna impedancja falowa ośrodka 1 jest większa (ośrodek gęstszy) niż oporność ośrodka 2, tak więc $m > 1$, tym samym $R_p < 1$. Ujemna wartość współczynnika odbicia oznacza, że faza ciśnienia akustycznego fali odbitej jest przeciwna fazie ciśnienia fali padającej – rys.18a. W drugim przypadku, kiedy fala przechodzi z ośrodka rzadszego do gęstszego ($m < 1$) $R_p > 1$ – rys. 18b.

Przykład:

Jako przykład obliczmy współczynniki odbicia R_p i przenikania D_p dla granicy ośrodków „stal/woda” – rys.18a. Dla fal podłużnych mamy:

$$Z_1 = 45 \cdot 10^6 \text{ [Pa} \cdot \text{s/m]} \quad (\text{stal})$$

$$Z_2 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ [Pa} \cdot \text{s/m]} \quad (\text{woda})$$

Stąd mamy:

$$R_p = [1,5 - 45] / [1,5 + 45] = -0,935$$

$$D_p = 3,0 / [1,5 + 45] = 0,065$$

Fala odbita ma – 93,5% ciśnienia dźwięku fali padającej, a fala przechodząca 6,5%.

Ujemny znak współczynnika R_p wskazuje zmianę kierunku fazy względem padającej fali. Jeżeli w danym momencie padająca fala osiąga dodatnie maksimum ciśnienia dźwięku (zwiększone ciśnienie), fala odbita ma w tym samym momencie swoje ujemne maksimum (zredukowane ciśnienie).

Zmiana fazy, oznaczona ujemną wartością R_p , pojawia się zawsze w przypadku odbicia od materiału bardziej miękkiego akustycznie.

Jeżeli w przypadku odwrotnym (rys. 18b) fala dźwiękowa przechodząc przez wodę pada na stal, czyli gdy granicą ośrodków jest teraz „woda/stal”, to zmiana Z_1 i Z_2 daje:

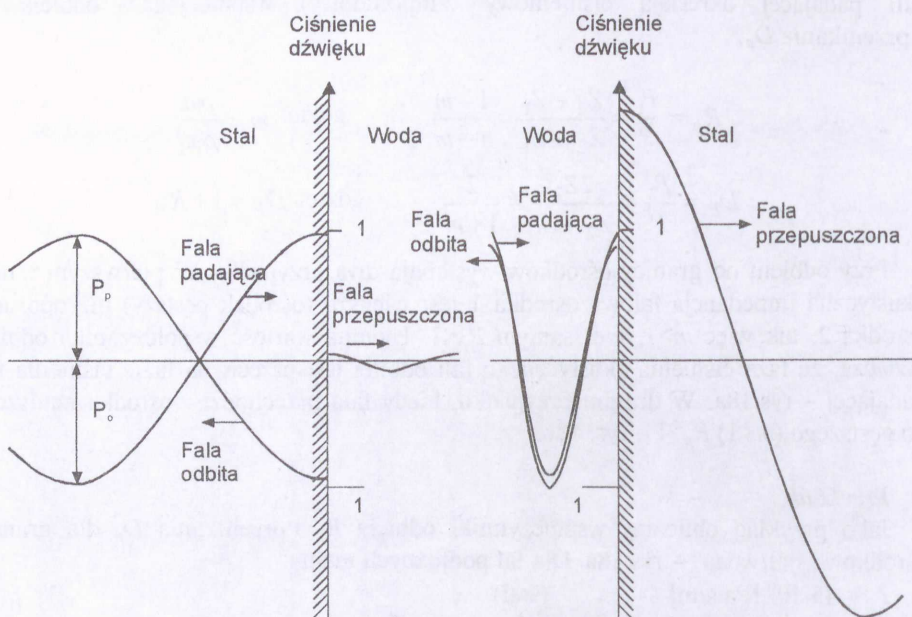
$$R_p = [45 - 1,5] / [45 + 1,5] = +0,935$$

$$D_p = 2 \cdot 45 / [45 + 1,5] = 1,935$$

Ponieważ R_p jest teraz dodatnie, to fale padająca i odbita są zgodne fazowo.

Fala przechodząca ma 193,5% ciśnienia dźwięku fali padającej. Wygląda to paradoksalnie i można by się dopatrywać zaprzeczenia zasady zachowania energii, tym niemniej natężenie (energia przez jednostkę czasu i powierzchni) określa się nie tylko z ciśnienia dźwięku, ale również z impedancji akustycznej materiału, w którym przemieszcza się fala.

Impedancja stali jest dużo większa niż wody, a więc natężenie fali przechodzącej w stali jest dużo mniejsze niż w wodzie.



Rys. 18. Wartości ciśnienia dźwięku w przypadku odbicia i przejścia fali na granicy ośrodków woda/stal: a – fala padająca od strony stali, b – fala padająca od strony wody

Gazy w porównaniu do cieczy i ciał stałych mają bardzo małą impedancję akustyczną. Dla powietrza jest ona rzędu $0,0004 \cdot 10^6$ [Pa·s/m], dlatego dla granicy ośrodków „stal/powietrze” współczynnik odbicia jest bliski 1. Powierzchnie rozdziału z powietrzem mogą być traktowane jak powierzchnie rozdziału z próżnią i są nazywane granicami swobodnymi.

Fale poprzeczne są zawsze całkowicie odbijane w ciałach stałych na powierzchniach granicznych z cieczami lub gazami, ponieważ nie rozchodzą się w tych ośrodkach. Dla fal poprzecznych wzory na R i D są więc istotne tylko w przypadku powierzchni granicznej „ciało stałe/ciało stałe” (tablica 4).

Własności akustyczne metali i stopów zależą od ich struktury i warunków wytopu. Stąd dla badanej próbki własności te mogą odbiegać nieco od podanych w tablicy 4.

Procent padającej energii odbitej od powierzchni granicznej pomiędzy dwoma materiałami zależy od stosunku impedancji akustycznych (Z_2/Z_1) i kąta padania. Kiedy kąt padania jest równy 0° (padanie prostopadłe) energetyczny współczynnik odbicia, R_I (tablica 5) wynosi:

$$R_I = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \left(\frac{r - 1}{r + 1} \right)^2$$

Tablica 4

Ciśnieniowy współczynnik odbicia R dla różnych ośrodków [%]

Ośrodek	Aluminium	Magnez	Miedź	Mosiądz	Nikiel	Stal	Ołów	Rtęć	Guma twarda	Guma miękka	Szkło	PMM	Porcelana	Olej silnikowy	Woda
Aluminium	0	26	41	29	49	46	18	7	72	85	8	68	13	84	85
Magnez		0	63	60	69	65	45	35	55	75	18	53	13	76	74
Miedź			0	15	8	4	26	36	87	94	50	86	53	93	93
Mosiądz				0	23	19	12	22	83	91	38	86	41	92	93
Nikiel					0	4	34	33	89	94	56	88	58	95	94
Stal						0	30	40	88	94	52	87	57	94	94
Ołów							0	11	80	89	28	77	32	89	89
Rtęć								0	75	87	18	72	20	86	87
Guma twarda									0	50	67	7	40	30	31
Guma miękka										0	32	40	80	3	4
Szkło											0	7	65	30	80
PMM												0	60	40	40
Porcelana													0	81	80
Olej silnikowy														0	0
Woda															0

gdzie:

 I_r – intensywność wiązki odbitej, I_i – intensywność wiązki padającej, Z_1, Z_2 – impedancja akustyczna ośrodków 1 i 2, $r = Z_2/Z_1$ – stosunek impedancji (współczynnik niedopasowania).

Wraz z D_I określanym jako współczynnik transmisji, R_I stanowi 100%, ponieważ cała energia jest odbijana lub przesyłana dalej.

$$R_I + D_I = 100\%.$$

Energetyczny współczynnik przenikania D_I można również obliczyć uwzględniając intensywność wiązki przechodzącej I_t , stąd:

$$D_I = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_2 \cdot Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{4r}{(r+1)^2}$$

Energetyczne współczynniki odbicia dla różnych ośrodków

Ośrodek	Aluminium	Miedź	Mosiądz	Olej maszynowy	Powietrze	Pleksyglas	Stal	Staliwo	Woda	Żeliwo szare
Aluminium	0	18	14	71	100	46	21	3	72	10
Miedź		0	0,5	86	100	74	0,2	8	87	2
Mosiądz			0	85	100	74	4	4	86	0,4
Olej maszynowy				0	100	16	88	77	0	83
Powietrze					0	100	100	100	100	100
Pleksyglas						0	76	100	16	68
Stal							0	10	88	4
Staliwo								0	79	3
Woda									0	84
Żeliwo szare										0

Przykład:

Kiedy fala podłużna w wodzie (ośrodek 1) pada pod kątem prostym na powierzchnię próbki stali (ośrodek 2), procent energii akustycznej odbitej i przechodzącej oblicza się następująco (dane z tablicy 4).

Stosunek impedancji r :

$$r = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{4,66}{0,149} = 31,275$$

Współczynnik odbicia R_I :

$$R_I = \left(\frac{r-1}{r+1} \right)^2 = \left(\frac{30,275}{32,275} \right)^2 = 0,88 = 88\%$$

Współczynnik transmisji D_I :

$$D_I = 1 - R_I = 0,12 = 12\%$$

Takie same wartości R_I i D_I otrzymamy, gdy ośrodkiem 1 będzie stal, a ośrodkiem 2 woda. Dla każdej pary materiałów zmiana ich kolejności nie powoduje zmiany wartości R_I i D_I .

Efekty impedancji akustycznej można wykorzystać do obliczenia ilości dźwięku odbijanego przy badaniu elementów zanurzonych w wodzie. Na przykład gdy fala dźwię-

kowa pada prostopadłe ($\alpha=0^\circ$) na powierzchnię wolnej od wad płyty stalowej przy badaniu głowicą normalną, ilość dźwięku, która powraca do głowicy, stanowi tylko ok. 1,3% intensywności wiązki padającej. Zmniejszenie to jest efektem rozdziału energii na granicach woda/stal, stal/woda na skutek częściowego odbicia fal – rys. 19. Dodatkowe straty mogą się pojawić na skutek absorpcji i rozpraszania fal.

Podobnie można obliczyć straty energii dla nieciągłości tworzących idealnie odbijającą powierzchnię, takich jak rozwarstwienia położone prostopadłe do ścieżki dźwięku i o wymiarach większych niż wiązka dźwięku. Na przykład przy badaniu głowicą normalną stali węglowej z rozwarstwieniem, intensywność wiązki odbitej od rozwarstwienia rejestrowanej przez głowicę wynosi 1,44% (dla porównania intensywność wiązki odbitej od płyty, która nie zawiera rozwarstwień stanowi tylko 1,3% intensywności wiązki padającej). W tablicy 6 podano wyniki podobnych obliczeń strat energii na granicy ośrodków metal/woda w badaniach zanurzeniowych niektórych metali.

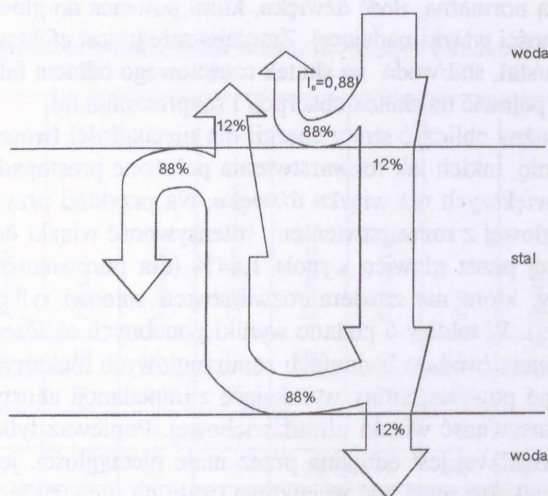
Jak wykazano powyżej, straty wynikające z impedancji akustycznej mogą znacznie zmniejszyć intensywność wiązki ultradźwiękowej. Ponieważ tylko mała część obszaru wiązki ultradźwiękowej jest odbijana przez małe nieciągłości, jest oczywiste, że urządzenie ultradźwiękowe musi być wyjątkowo czułe na niewielkie zmiany intensywności w przypadku wykrywania małych wad. Intensywność wiązki dźwiękowej w technikach kontaktowych jest zazwyczaj większa niż w technikach immersyjnych, co oznacza, że mniejsze nieciągłości będą dawały sygnał o wyższej amplitudzie. Składają się na to głównie dwa czynniki:

1. Tylną ściankę próbki badanej stanowi granica metal/powietrze, które można traktować jako całkowity reflektor. Odnosząc to do powierzchni kontaktowej metal/woda, daje to w wyniku ok. 10% wzrost intensywności echa dna,

2. Jeżeli jako cieczy sprzęgającej zamiast wody użyjemy substancji o impedancji akustycznej zbliżonej do impedancji próbki badanej, to większa ilość energii jest przenoszona przez granicę zarówno w przypadku wiązki padającej jak i powrotnej.

Dla większości zastosowań korzystna jest ciecz sprzęgająca o impedancji akustycznej wyższej niż dla wody.

Wiązka dźwiękowa rozchodząca się w ośrodku jednorodnym jest spójna, tzn. wszystkie cząstki, które leżą w danej płaszczyźnie równoległej do czoła fali, drgają w identyczny sposób. Kiedy czoło fali osiąga krawędź powierzchni odbijającej, czoło fali wygina się dookoła krawędzi, podobnie jak światło na krawędzi nieprzezroczystego obiektu. Gdy reflektor jest bardzo mały w porównaniu do wiązki dźwięku, jak np. pory czy wtrącenia, fala zaginająca się na krawędziach reflektora wytwarza pole interferencyjne w strefie tuż za reflektorem z powodu różnic fazowych wśród różnych porcji wiązki. Pole interferencyjne składa się z obszarów maksymalnej i minimalnej intensywności, występujących na przemian. Fale interferencyjne są wtedy kolejno zgodne fazowo lub nie.



Rys. 19. Zmiana intensywności wiązki przy przejściu i odbiciu na granicy ośrodków woda/stal i stal/woda

Tablica 6

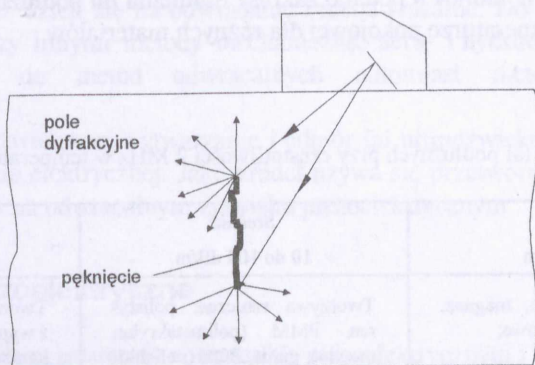
Zmiany intensywności wiązki powracającej na skutek strat spowodowanych impedancją na granicy ośrodków metal/woda

Material	Intensywność wiązki powracającej [% intensywności wiązki padającej]
Stop magnezu M1A	11,0
Tytan	3,0
Stal nierdzewna 302	1,4
Stal węglowa	1,3
Inconel	0,7
Wolfram	0,3

Przy opracowywaniu procedury badań ultradźwiękowych należy brać pod uwagę zjawisko dyfrakcji. Chropowatość powierzchni wejściowej, rodzaj obróbki powierzchniowej, kierunek skrawania mają wpływ na postępowanie przy badaniu. Ponadto chropowatość powierzchni wady wpływa na kształt echa i musi być również uwzględniona. Wiązka dźwięku, padając na gładką powierzchnię graniczną, jest odbijana i załamana, ale pole dźwięku jest spójne fazowo i zachowanie wiązki można przewidzieć analitycznie. Chropowata powierzchnia graniczna zmienia warunki brzegowe i część wiązki ulega ugięciu, powodując powstanie tzw. pól dyfrakcyjnych (rys. 20). Dyfrakcja może

zachodzić na krawędziach pęknięć, braków przetopu, porach, ziarnach i wtrąceniach. W wyniku oddziaływania fali z takimi przeszkodami zmienia się nie tylko kierunek, ale także amplituda i faza fali. Wszystkie te zmiany są źródłem informacji o rodzaju defektu, na którym wystąpiła dyfrakcja, ale są one trudne do interpretacji ze względu na niemożliwość zastosowania praw geometrii optycznej.

Pole bliskie (strefa Fresnela) charakteryzuje się tym, że jego przekrój poprzeczny ma w przybliżeniu ten sam kształt co źródło drgań, tzn. nie występuje w nim rozbieżność wiązki ultradźwiękowej, nie ma tu więc strat rozbieżności (obniżenie ciśnienia akustycznego). W odległości większej niż ta, w której znajduje się ostatnie maksimum ciśnienia akustycznego w osi źródła, występuje strefa przejściowa i pole dalekie (strefa Fraunhofera). W polu dalekim, w odróżnieniu od pola bliskiego, wiązka staje się rozbieżna, przybierając w przybliżeniu kształt stożka. Amplituda w polu dalekim maleje proporcjonalnie do odległości od źródła fali.



Rys. 20. Powstawanie pól dyfrakcyjnych na krawędziach wady

Oddalając się od osi wiązki, ciśnienie akustyczne spada. Kąt rozwarcia wiązki φ w polu dalekim, dla określonego spadku ciśnienia akustycznego ΔP , można określić ze wzoru:

$$\sin \varphi = k \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Współczynnik k dla kilku wartości ΔP zamieszczono w tablicy 7.

Jak wynika z powyższego wzoru, wzrost stosunku λ/D prowadzi do zmniejszenia rozbieżności wiązki.

Tablica 7

Współczynnik k do określania charakterystyki kierunkowej przetwornika kołowego

ΔP [dB]	3	6	10	20	∞
ΔP [%]	30	50	70	90	100
k	0,51	0,70	0,87	1,08	1,22

Całkowite tłumienie fali ultradźwiękowej w polu dalekim można wyrazić jako:

$$P = P_0 \exp(-\alpha L)$$

gdzie P_0 i P są to ciśnienia akustyczne kolejno na początku i końcu przekroju materiału o długości L i współczynnika tłumienia α . Jednostką współczynnika tłumienia α jest decybel na metr [dB/m]. Wartości liczbowe α zwykle mieszczą się pomiędzy jeden a kilkaset dB/m. W tablicy 8 podano zakresy tłumienia fal podłużnych przy częstotliwości 2 MHz i w temperaturze pokojowej dla różnych materiałów.

Tablica 8

Tłumienie fal podłużnych przy częstotliwości 2 MHz w temperaturze pokojowej

Małe do 10 dB/m	Średnie 10 do 100 dB/m	Duże powyżej 100 dB/m.
Odlewy: aluminium, magnez, czyste lub niskostopowe; do przeróbki plastycznej: stal, aluminium, magnez, nikiel, srebro, tytan, wolfram; niemetale: szkło, porcelana	Tworzywa sztuczne: polistyren, PMM (polimetakrylan metylu), guma, PCV (polichlorek winylu); stopowe odlewy aluminium i magnezu, staliwa, żeliwa niskostopowe wysokojakościowe; do przeróbki plastycznej: miedź, cynk, brązy, mosiądze, ołów, spieki metalowe	Tworzywa sztuczne i guma z wypełniaczami, guma wulkanizowana, drewno; staliwo wysokostopowe, niskowytrzymałe żeliwa, odlewy miedzi, cynku, mosiądze i brązy Niemetale: porowata ceramika, skały

Fale poprzeczne generalnie są silniej tłumione niż fale podłużne, szczególnie w tworzywach sztucznych.

ROZDZIAŁ II

ZASADY BADAŃ ULTRADŹWIĘKOWYCH

Metody wytwarzania i odbioru ultradźwięków klasyfikuje się w zależności od sposobu przetwarzania energii. Jeżeli przetwarzamy energię pierwotną w energię fal ultradźwiękowych – mówimy o generatorach lub nadajnikach. Jeżeli odwrotnie – odbieramy energię ultradźwiękową jako pierwotną i przetwarzamy na inny rodzaj – mówimy o odbiornikach ultradźwiękowych. Często są one odwracalne, tzn. ten sam układ może działać albo jako nadajnik albo jako odbiornik, chociaż nie zawsze z taką samą sprawnością w każdą stronę. Z uwagi na tę ostatnią cechę niektórych przetworników metody przetwarzania również dzieli się na odwracalne i nieodwracalne. Do metod nieodwracalnych należą między innymi metody mechaniczne, aero- i hydromechaniczne, termiczne i optyczne, do metod odwracalnych natomiast metody elektryczne i magnetyczne.

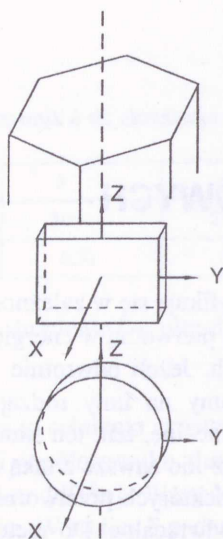
W technice ultradźwiękowej wytwarzanie i odbiór fal ultradźwiękowych najczęściej oparty jest na metodzie elektrycznej. Jako źródło używa się przetworników elektroakustycznych, bazujących na odwracalnym zjawisku piezoelektrycznym.

2.1. Zjawisko piezoelektryczne

Efekt piezoelektryczny występuje w materiale piezoelektrycznym i polega na tym, że jeżeli odkształcimy go ciśnieniem zewnętrznym, to na jego powierzchniach pojawi się ładunek elektryczny. Zjawisko to zostało odkryte w 1880 roku przez braci Curie i nosi nazwę bezpośredniego zjawiska piezoelektrycznego. Efekt polegający na odkształceniu materiału po przyłożeniu zewnętrznego pola elektrycznego, odkryty nieco później (1881) nosi nazwę odwrotnego efektu piezoelektrycznego.

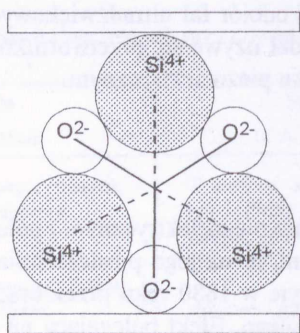
Pierwszym, stosowanym handlowo materiałem piezoelektrycznym, był kwarc. Jego własności jako generatora ultradźwięków bardzo silnie zależą od kierunku, w jakim kryształ został przecięty. Na rys. 21 przedstawiono przykład tzw. cięcia X, tzn. oś X jest prostopadła do powierzchni płytki, a oś Y i Z leżą w jej płaszczyźnie.

Przyłożenie zewnętrznego ciśnienia powoduje niewielkie odkształcenie płytki w zakresie sprężystym, co wywołuje przesunięcie jonów Si^{4+} i O^{2-} tworzących sieć kryształu SiO_2 . Następuje przesunięcie środków ciężkości ładunków dodatnich i ujemnych, a więc zaindukowanie dipola elektrycznego, a co za tym idzie obie powierzchnie płytki ulegają polaryzacji (rys. 22). Efekt odwrotny tzn. zmianę grubości płytki uzyskujemy po umieszczeniu jej w zewnętrznym polu elektrycznym.

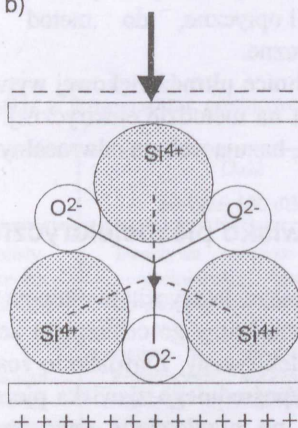


Rys. 21. Orientacja płytek kwarcu (prostokątnych i okrągłych) dla tzw. cięcia X

a)



b)



Rys. 22. Powstawanie ładunków elektrycznych na okładkach przetwornika kwarcowego: a – stan nie odkształcony; b – stan odkształcony

Kwarc jako nadajnik przedstawia sobą szereg zalet takich jak: stabilność elektryczna i termiczna, brak rozpuszczalności w większości cieczy, wysoka mechaniczna wytrzymałość, odporność na ścieranie, doskonała jednorodność i odporność na starzenie. Jednakże stosunkowo niska sprawność przemiany elektromechanicznej spowodowała wyparcie go przez inne materiały.

Najczęściej stosowaną grupę materiałów piezoelektrycznych stanowią tzw. piezoceramiki, mające wysoką skuteczność przetwarzania energii elektrycznej na mechaniczną, np. tytanian baru (BaTiO_3), tytanian ołowiu (PbTiO_3), cyrkonian ołowiu (PbZrO_3).

Charakterystyki najczęściej stosowanych materiałów piezoelektrycznych przedstawiono w tablicy 9.

Tablica 9

Charakterystyki i zastosowanie przetworników piezoelektrycznych

Element piezo- elektryczny	Charakterystyka elementów piezoelektrycznych							Przydatność elementu w badaniach:		
	Sprawność				Odpor- ność na podwyż- szone temp.	Zdol- ność tłumie- nia	Nie- pożą- dane prze- mia- ny	Kontaktowe wiązką		Zanu- rze- niowe
	Wy- syła- nie	Od- biór	Sprzęże- nie z:					Prostą	Uko- śną	
			wo- da	me- tal						
Kwarc	Z.	D	D	S	D	S	D	D	S	D
Siarczan litu	S	BD	BD	Z	Z	BD	BD	Z	S	BD
Tytanian baru	D	Z.	D	D	Z	Z	Z	D	D	S
Tytanian cyrko- nowo ołowiowy	BD	S	S	BD	BD	S	Z	BD	BD	S
Metaniobian ołowiowy	D	S	D	BD	BD	BD	D	BD	BD	D
BD – bardzo dobre, D – dobre, S – słabe, z – złe										

2.2. Inne metody wysyłania i odbierania ultradźwięków

Zjawisko piezoelektryczne tak i inne zjawiska fizyczne (omówione dalej) mogą być wykorzystywane do wytwarzania i odbierania ultradźwięków. Chociaż wiele z nich wytwarza sygnały słabsze niż uzyskiwane podczas zjawiska piezoelektrycznego, to jednak mają one pewne zalety powodujące przydatność tych metod podczas specjalnych badań materiałów. W wielu przypadkach energia jest przenoszona za pomocą pola elektrycznego lub magnetycznego, co powoduje, że nie jest potrzebny bezpośredni kontakt z metaliczną powierzchnią próbki. Przemiana energii akustycznej ma miejsce na powierzchni próbki, która stanowi więc część przetwornika akustycznego. Metody te tym samym nie wymagają cieczy sprzęgającej.

Dalej omówione zostaną niektóre zjawiska fizyczne umożliwiające przekazywanie i odbieranie ultradźwięków.

2.2.1. Zjawiska mechaniczne

Dźwięk można wytworzyć w ciele stałym przez uderzenie mechaniczne lub tarcie. Zjawisko to jest dobrze znane w zakresie słyszalnym, wytwarza szerokie widmo częstotliwości zachodzące także na zakres MHz. Zakres zależy od kształtu, rozmiaru i materiału poddanego uderzeniu czy tarcii. Wytwarzane są wszystkie rodzaje fal, najsilniejszej

z zakresu 100 kHz do 1 MHz. Dlatego metody te mogą być wykorzystane do badania betonu, żeliwa czy podobnych materiałów.

2.2.2. Zjawiska cieplne i techniki laserowe

Nagle nagrzanie powierzchni ciała (szok cieplny) powoduje rozszerzenie cieplne materiału, co wytwarza naprężenia mechaniczne inicjujące falę dźwiękową. Jeżeli nagrzanie ma bardzo krótki czas trwania (rzędu 10 ns), może zostać wytworzona gwałtowna fala o bardzo wysokiej częstotliwości. Wymagana jest mała grubość nagrzanej warstwy w porównaniu z długością fali dźwiękowej. Wytwarzane są wszystkie rodzaje fal dźwiękowych. Odpowiednia energia jest kierowana na powierzchnię badanej próbki i może być uwolniona na dwa sposoby:

- jako fale elektromagnetyczne (mikrofale, fale podczerwone, widzialne i światło ultrafioletowe),
- jako wiązka elektronowa.

Bardzo dużą zaletą takiego sposobu wytwarzania ultradźwięków jest to, że nie wymagany jest bezpośredni kontakt z przedmiotem oraz że fale ultradźwiękowe w badanej próbce mogą być wytwarzane z dużej odległości (nawet 10 m). Impulsy ultradźwiękowe odbiera się za pomocą optycznego interferometru laserowego.

Wykorzystanie lasera wymaga jednak skomplikowanego oprzyrządowania i jest stosowane tylko wtedy, gdy nie można zastosować innych technik, np. gdy badana próbka jest bardzo gorąca lub jest radioaktywna.

2.2.3. Metody elektrostatyczne

Pomiędzy płytkami naładowanego kondensatora występują elektrostatyczne siły przyciągania. Zjawisko to może być wykorzystane do bezpośredniego wzbudzania dźwięku w próbce lub do skonstruowania głowicy przekaźnikowej. W pierwszym przypadku elektroda może być utrzymywana w małej odległości od powierzchni metalicznej próbki i poddawana zmiennemu napięciu. Siły mechaniczne na powierzchni wytwarzają falę ultradźwiękową o tej samej częstotliwości jak napięcie. Ponieważ są one prostopadłe do powierzchni, jako uprzywilejowane wytwarzane będą fale poprzeczne. Otrzymane amplitudy drgań są zazwyczaj bardzo małe, ale tą metodą można wytworzyć fale o bardzo dużych częstotliwościach.

2.2.4. Metody elektrodynamiczne

Metody elektrodynamiczne oparte są na sile Lorenza F , która działa na ładunek elektryczny, poruszający się w polu magnetycznym o indukcji B z prędkością v :

$$\vec{F} \approx e \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Cewka, przez którą płynie prąd zmienny, jest umieszczona na ciele przewodzącym prąd elektryczny, w którym są indukowane prądy wirowe. Na skutek oddziaływania pomiędzy prądami wirowymi i zewnętrznym polem magnetycznym, w jednostce objętości badanej próbki powstaje siła Lorenza, która generuje fale dźwiękowe. Przez wybór

kierunku pola magnetycznego B można wytwarzać zarówno fale podłużne jak i poprzeczne. Częstotliwość fal dźwiękowych odpowiada częstotliwości zmiennego pola magnetycznego. Tę samą procedurę można zastosować do odbioru fal ultradźwiękowych. Fala ultradźwiękowa wytwarza mechaniczną wibrację cząstek w jednostce objętości. Jeżeli taki element objętości porusza się w statycznym polu magnetycznym, wibracje te indukują zmienne pole magnetyczne, które może być odbierane przez drugą cewkę.

W technikach impulsowych muszą być wytwarzane stosunkowo duże siły pola magnetycznego. Ponadto odstęp między głowicą a badaną próbką musi być możliwie mały.

Czułość tej metody jest zbyt niska, aby wykryć małe defekty, lecz jest ona bardzo dokładna przy pomiarach grubości ścianki. Innym specjalnym zastosowaniem tej metody jest pomiar orientacji głowic piezoelektrycznych.

2.2.5. Metody magnetostrykcyjne

Prawie wszystkie materiały ferromagnetyczne odkształcają się mechanicznie po umieszczeniu ich w polu magnetycznym. Zjawisko to nosi nazwę magnetostrykcji. Jeżeli zastosujemy zmienne pole magnetyczne, w rezultacie wytworzymy fale dźwiękowe. Głowice magnetostrykcyjne wytwarzają dźwięk o wysokiej energii i niskiej częstotliwości, w przybliżeniu do 100 kHz.

2.3. Techniki pomiarowe

Do wykrywania wad materiałowych można stosować różne metody badania. Ze względu na sposób przyłożenia głowicy do badanego elementu rozróżniamy:

a) techniki kontaktowe – głowica (lub układ głowic) przyłożone są bezpośrednio do powierzchni badanego przedmiotu przez bardzo cienką warstwę środka sprężającego (zapewniającego dobry kontakt akustyczny,

b) techniki zanurzeniowe – głowice i przedmiot badany zanurzone są w cieczy zapewniającej kontakt akustyczny. Głowice są oddalone od powierzchni przedmiotu.

Ze względu na sposób identyfikacji wady rozróżniamy:

a) metodę echa – wadę identyfikujemy na podstawie tzw. „echa” – na ekranie defektoskopu rejestrowany jest impuls będący efektem odbicia fal od wady,

b) metodę przepuszczania (cienia) – wada stanowi przeszkodę na drodze fal pomiędzy głowicą nadawczą i odbiorczą – obserwujemy spadek amplitudy lub zanik impulsu przejścia na ekranie defektoskopu.

Podstawowa różnica między tymi dwoma metodami polega na tym, że metoda cienia obejmuje tylko pomiar tłumienia sygnału, podczas gdy metoda echa może być użyta do pomiaru zarówno czasu przejścia jak i tłumienia sygnału.

2.3.1. Metoda echa

W badaniach ultradźwiękowych najczęściej stosowana jest metoda echa. Polega ona na wykryciu ech powstających w wyniku odbicia impulsu ultradźwiękowego od nieciągłości lub powierzchni rozdziału w próbce. Metoda ta jest stosowana do lokalizacji defektów

i pomiarów grubości. Głębokość wady określana jest na podstawie czasu przejścia pomiędzy echem początkowym, a echem wytworzonym przez wadę. Głębokość tę można także określić z relacji między czasem przejścia echa od wady i echa od dna. Wielkość wady jest określana przez porównanie amplitudy sygnału wiązki odbitej od wady z amplitudą dźwięku odbitego od reflektora odniesienia o znanym rozmiarze, np. dna próbki badanej.

W metodzie tej wprowadzamy krótkie impulsy ultradźwiękowe w regularnych przedziałach czasowych. Jeżeli impuls napotka jakąś powierzchnię odbijającą, pewna jego część lub całość zostaje odbita. Wielkość odbicia zależy od wielkości powierzchni odbijającej w stosunku do wymiarów padającej wiązki. Kierunek wiązki odbitej zależy od orientacji powierzchni odbijającej w stosunku do kierunku padania fali. Mierzy się zarówno ilość odbitej energii w charakterystycznym kierunku jak i czas pomiędzy wysłaniem impulsu a odebraniem echa.

W najczęściej stosowanych układach pomiarowych ten sam oscylator pracuje cyklicznie jako nadajnik i odbiornik.

Kształt echa jest przede wszystkim związany z kształtem, orientacją i zdolnością odbijania dźwięku przez powierzchnię graniczną. Granica metal/powietrze wytwarza bardzo wyraźne, ostre wskazania, jeżeli powierzchnia odbijająca jest stosunkowo gładka i równoległa do powierzchni przyłożenia. Jeżeli jest ona zakrzywiona (np. powierzchnia dużej pory) lub chropowata (taka jak pęknięcie czy rozwarstwienie) albo nie odbija idealnie (np. powierzchnia wtrąceń niemetalicznych lub żużli), uzyskane echo będzie znacznie poszerzone. Jeżeli powierzchnia odbijająca będzie mniejsza od szerokości padającej wiązki, będziemy obserwowali również echo dna. W przypadku reflektorów o rozmiarach większych, echo dna nie będzie widoczne. Różne typy obrazów uzyskanych w metodzie echa dla przykładowych wad pokazano na rysunku 23.

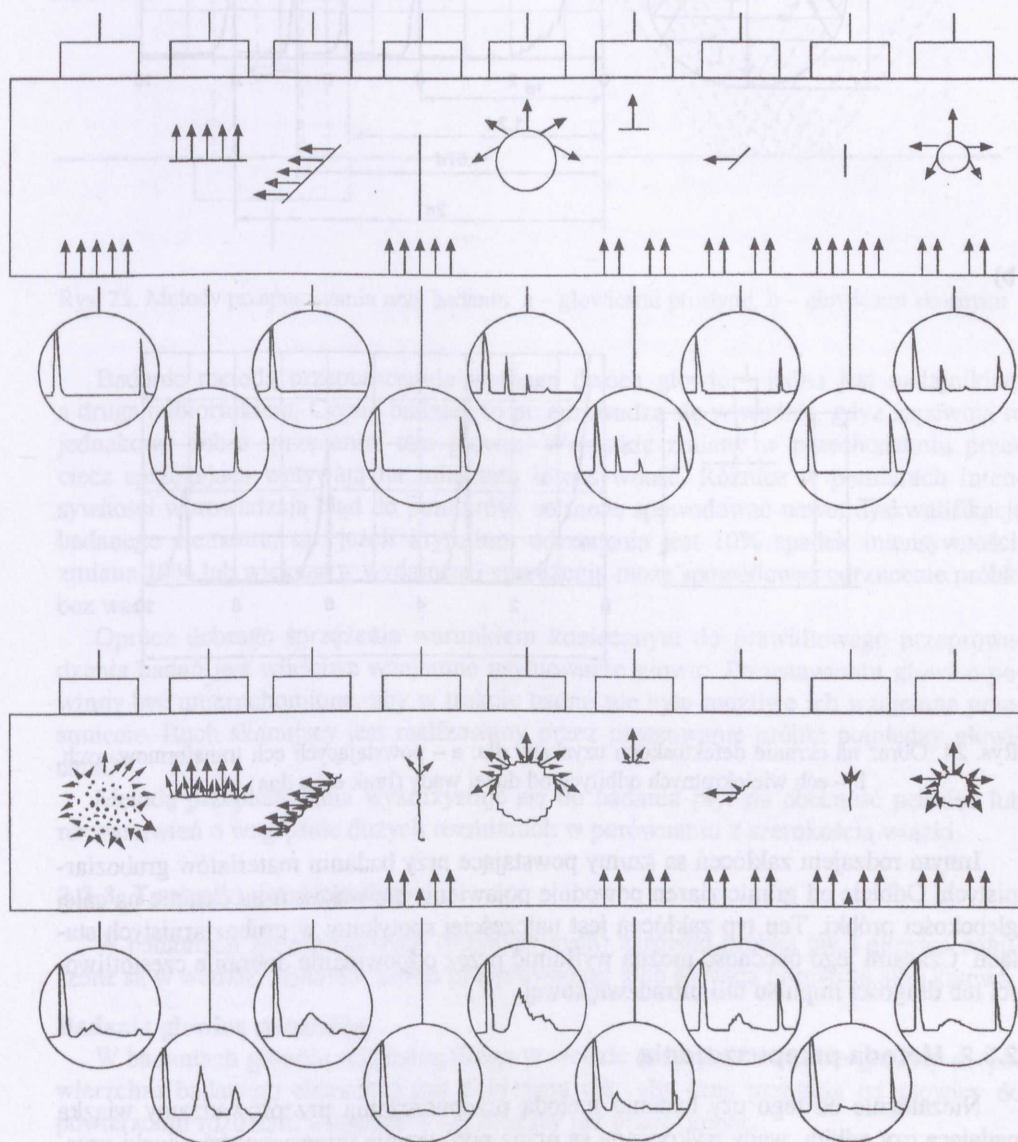
Miarą intensywności jest amplituda echa odbitej wiązki ultradźwiękowej. W przypadku reflektorów płaskich, równoległych do powierzchni przyłożenia jest ona wprost funkcją obszaru odbijającego. Jeżeli reflektor jest kulisty, zakrzywiony lub nie jest prostopadły do padającej wiązki, amplituda echa będzie obniżona. Należy o tym zawsze pamiętać, gdyż taki wpływ chropowatości, kształtu i orientacji reflektora na amplitudę echa wprowadza błędy przy ocenie wielkości wady.

Oprócz zakłóceń w postaci ech od wad czy powierzchni granicznych mogą pojawić się na ekranie wskazania innego rodzaju. Na przykład echa od krawędzi, naroży, dodatkowe odbicia wynikające z transformacji fal – rys. 24a czy wielokrotne odbicia od pojedynczej powierzchni mogą czasami wyglądać jak wskazania od wad – rys. 24b. Czasami te wskazania można zidentyfikować dzięki zależności między występującą wadą a własnościami fizycznymi próbki, lecz bardzo często tylko doświadczenie operatora oraz wstępna analiza możliwych do wystąpienia wad oraz ich położenia pozwala na oddzielenie fałszywych wskazań od rzeczywistych.

Tego typu wskazania są często spotykane np. w badaniach falą podłużną z jednej strony długich wałów, badanie próbek o złożonym kształcie, badanie elementów, w których mogą wystąpić transformacje fali lub przy badaniach falą powierzchniową.

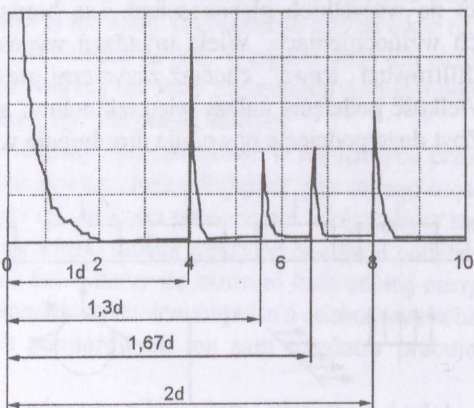
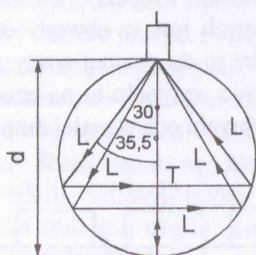
Istnieje też druga grupa wskazań, które wynikają z zakłóceń pojawiających się w układzie elektronicznym defektoskopu. Szum elektroniczny ma z reguły niższą amplitudę i jest kłopotliwy tylko wtedy, gdy sygnał główny również ma niską amplitudę. W badaniach ultradźwiękowych pojawiają się one jako tło lub tzw. „trawa” na linii pod-

stawowej na wszystkich głębokościach i są bardzo dobrze widoczne zwłaszcza przy wyższych wzmocnieniach. Wiele urządzeń wyposażonych jest w obwody odcinające, które odfiltrowują „trawę”, chociaż zazwyczaj prowadzi to do pewnej straty amplitudy echa. Wielkość podcięcia należy więc tak dobrać, aby nie wpłynęło to na czułość przyrządu. Zbyt duże podcięcie powoduje utrudnienia w wykryciu ech o małej amplitudzie.

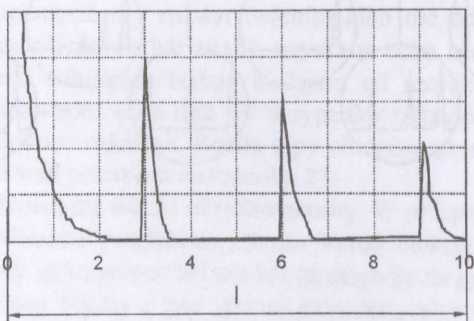
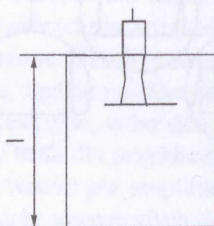


Rys. 23. Wpływ wielkości, orientacji i powierzchni wady na obraz wady na ekranie defektoskopu

a)



b)

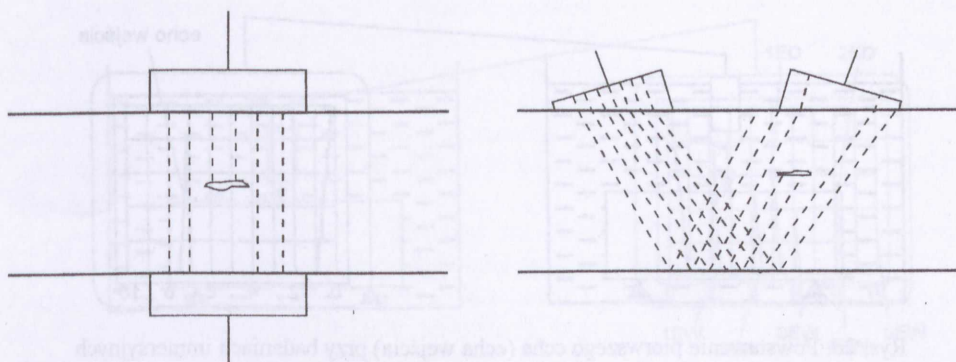


Rys. 24. Obraz na ekranie defektoskopu uzyskany dla: a – powstających ech transformowanych, b – ech wielokrotnych odbitych od dużej wady (brak echa dna)

Innym rodzajem zakłóceń są szумы powstające przy badaniu materiałów gruboziarnistych. Odbicie od granic ziaren powoduje pojawienie się wskazań na ekranie na całej głębokości próbki. Ten typ zakłóceń jest najczęściej spotykany w gruboziarnistych stalach. Czasami jego obecność można wyłumić przez odpowiednie dobranie częstotliwości lub długości impulsu fali ultradźwiękowej.

2.3.2. Metoda przepuszczania

Niezależnie od tego czy badania metodą przepuszczania przeprowadzamy wiązką padającą czy odbitą, wady wykrywane są przez porównanie intensywności wiązki przechodzącej przez próbkę badaną z intensywnością wiązki przepuszczanej przez wzorzec wykonany z tego samego materiału – rys. 25.



Rys. 25. Metody przepuszczania przy badaniu: a – głowicami prostymi, b – głowicami skośnymi

Badanie metodą przepuszczania wymaga dwóch głowic – jedna jest nadajnikiem a druga odbiornikiem. Często badanie to przeprowadza się w wodzie, gdyż zapewnia to jednakowo dobre sprzężenie, obu głowic. Wszystkie zmiany w przechodzeniu przez ciecz sprzęgającą wpływają na mierzoną intensywność. Różnice w pomiarach intensywności wprowadzają błąd do pomiarów, co może spowodować nawet dyskwalifikację badanego elementu, np. jeżeli kryterium odrzucenia jest 10% spadek intensywności, zmiana 10% lub większa w wydajności sprzężenia może spowodować odrzucenie próbki bez wad.

Oprócz dobrego sprzężenia warunkiem koniecznym do prawidłowego przeprowadzenia badań jest właściwe wzajemne usytuowanie głowic. Po ustawieniu głowice powinny być unieruchomione, aby w trakcie badań nie było możliwe ich wzajemne przesunięcie. Ruch skanujący jest realizowany przez przesuwanie próbki pomiędzy głowicami.

Metodę przepuszczania wykorzystuje się do badania płyt na obecność pęknięć lub rozwarstwień o względnie dużych rozmiarach w porównaniu z szerokością wiązki.

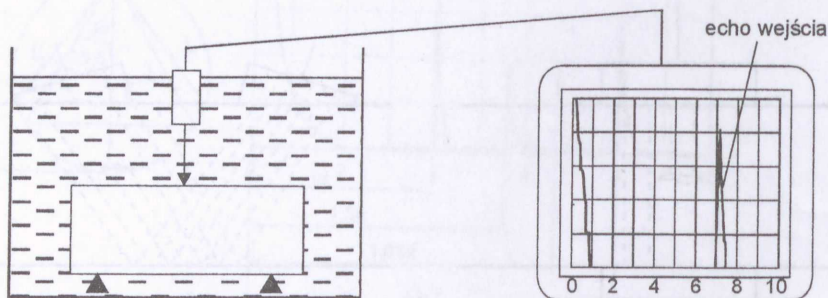
2.3.3. Techniki zanurzeniowe

W badaniach zanurzeniowych (immersyjnych) zarówno próbka jak i głowica zanurzone są w wodzie. Badania można przeprowadzać albo głowicą normalną albo kątową.

Badania głowicą normalną

W badaniach głowicą normalną droga w wodzie (odległość od czoła głowicy do powierzchni badanego elementu) jest dobierana tak, aby czas przejścia od głowicy do powierzchni rozdziału woda/metal był dłuższy niż przez próbkę.

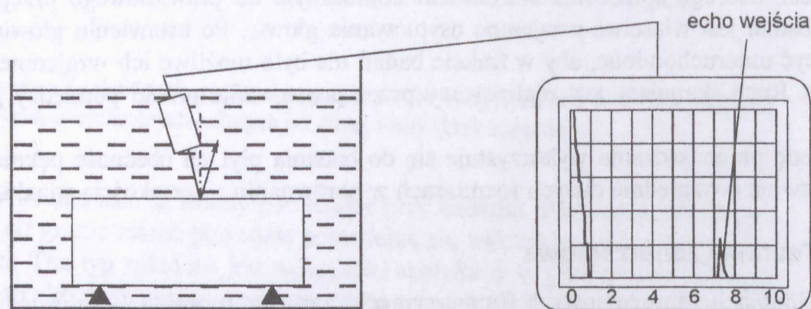
Głowica montowana jest w uchwycie tak, aby była ustawiona prostopadle do badanej powierzchni. Pierwsze echo, które pojawia się po echu początkowym nosi nazwę pierwszego echa wejścia. (rys. 26)



Rys. 26. Powstawanie pierwszego echa (echa wejścia) przy badaniach immersyjnych

Echo to powstaje, ponieważ tylko część energii dźwięku może przejść do próbki badanej – reszta jest odbijana i rejestrowana przez głowicę (patrz rozdział Impedancja). Stosunek pomiędzy ciśnieniem wiązki odbitej lub przechodzącej do ciśnienia dźwięku padającego określa współczynnik odbicia lub – jeżeli znamy impedancję akustyczną badanej próbki – współczynnik przejścia.

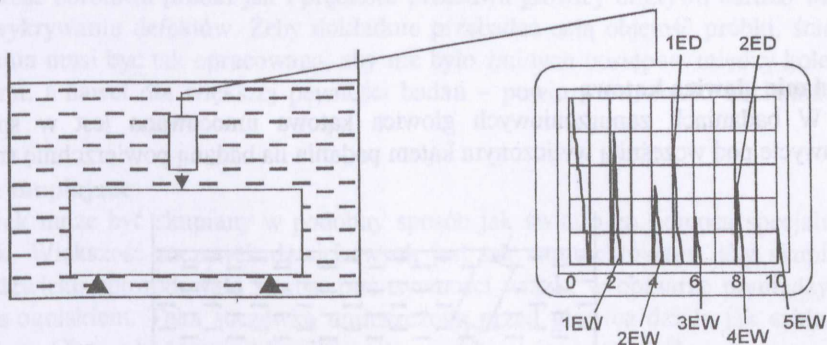
Echo wejścia wykorzystywane jest do właściwego ustawienia głowicy. Jeżeli wiązka dźwiękowa uderza powierzchnię badanej próbki dokładnie pod kątem prostym, echo wejścia osiąga maksymalną amplitudę. Jeżeli kierunek wiązki nie jest dokładnie prostopadły, amplituda echa maleje – rys. 27.



Rys. 27. Obniżenie amplitudy echa wejścia na skutek nieprostotpadłości wiązki padającej

Część dźwięku przechodząca do próbki odbija się dając sekwencję ech dna (oczywiście o ile badana próbka jest płasko-równoległa). Ponadto powstaje także sekwencja ech odbitych od powierzchni rozdziału woda/próbka. Należy tak dobrać grubość warstwy wody między głowicą a badaną próbką, aby przynajmniej jedno echo dna badanej próbki wystąpiło przed drugim echem wejścia. Jeżeli drugie echo wejścia pojawi się przed

pierwszym echem dna, nie będzie możliwa właściwa interpretacja wskazań. Należy więc wielkość tę wyliczyć tak, aby spełnić powyższe warunki. (rys. 28).



Rys. 28. Powstawanie ech wejścia i ech dna podczas badania zanurzeniowego przy niewłaściwej odległości głowicy od powierzchni próbki badanej

Przykład:

Badamy płasko-równoległą płytkę o grubości 40 mm metodą zanurzeniową. Jaka powinna być grubość warstwy wody między głowicą a badaną próbką, jeżeli $c_{L(stal)}=5920$ m/s, $c_{L(woda)}=1480$ m/s?

$$t_1 = \frac{a}{c_{L(woda)}} \quad t_2 = \frac{a}{c_{L(woda)}} + \frac{40}{c_{L(stal)}}$$

t_1 – czas przejścia wiązki ultradźwiękowej w warstwie wody o grubości a
 t_2 – czas przejścia wiązki ultradźwiękowej przez warstwę wody o grubości a i płytkę stalową o grubości 40 mm.

Aby otrzymać pierwsze echo dna przed drugim echem wejścia, musi być spełniony warunek:

$$t_2 < 2t_1$$

$$\frac{a}{c_{L(woda)}} + \frac{40}{c_{L(stal)}} < 2 \frac{a}{c_{L(woda)}}$$

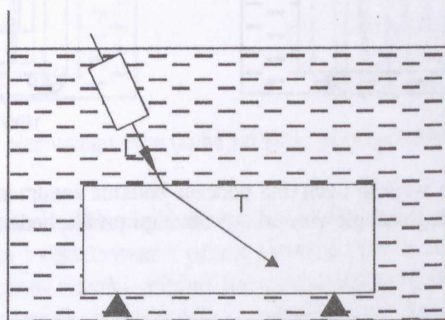
$$\frac{40}{c_{L(stal)}} < \frac{a}{c_{L(woda)}}$$

$$\frac{40}{5920} < \frac{a}{1480}$$

$$\alpha > 40 \frac{1480}{5920} = 0,25 \cdot 40 = 10 \text{ [mm]}$$

Badanie głowicą kątową

W badaniach zanurzeniowych głowica kątowa umocowana jest w specjalnym uchwycie pod wcześniej wyliczonym kątem padania na badaną powierzchnię (rys. 29).



Rys. 29. Zastosowanie głowicy kątowej w badaniach zanurzeniowych

Przykład:

W badaniach zanurzeniowych kąt padania w wodzie $\alpha(W)$ na powierzchnię próbki stalowej wynosi 10° . Jakie są kąty załamania (kąty skanowania) fal podłużnych i poprzecznych w badanej próbce?

1. Kąt załamanej fali podłużnej $\beta(L, St)$:

$$\sin \beta(L, St) = \sin 10^\circ \cdot (5920/1480) = 0,1736 \cdot 4 = 0,6946$$

$$\beta(L, St) = \arcsin 0,6946 = 44^\circ$$

2. Kąt załamanej fali poprzecznej $\beta(T, St)$:

$$\sin \beta(T, St) = \sin 10^\circ \cdot (3255/1480) = 0,1736 \cdot 2,2 = 0,3819$$

$$\beta(T, St) = \arcsin 0,3819 = 22,5^\circ$$

Prędkość skanowania

Powtarzalność wyników badań zanurzeniowych wymaga mechanizacji prowadzenia głowicy, gdyż ich ręczne przeprowadzenie nie jest możliwe. Bardzo często technika ta stosowana jest w automatycznych lub półautomatycznych badaniach:

- płytek wysokiej jakości,
- części maszyn, np. osi kół, dysków, pierścieni itd.,
- części o skomplikowanej geometrii,
- elementów okrągłych i rur.

Ścieżki skanowania płytek mają kształt równoległych linii. Dyski i pierścienie są obracane wokół swych osi, podczas gdy głowica wykonuje ruch odśrodkowy po promieniu.

Jeżeli skanowanie przeprowadza się od zewnętrznej powierzchni, głowica jest odwracana w kierunku osi.

Prędkość obrotowa próbki jak i prędkość przesuwu głowicy odgrywa bardzo ważną rolę w wykrywaniu defektów. Żeby dokładnie przebadac całą objętość próbki, ścieżka skanowania musi być tak opracowana, aby nie było żadnych odstępów między kolejnymi liniami, a nawet dla większej pewności badań – powinny te ścieżki nachodzić na siebie.

Głowice skupiające

Dźwięk może być skupiany w podobny sposób jak światło za pomocą specjalnych soczewek. Większość soczewek dźwiękowych jest tak zaprojektowana, aby skupienie energii dźwięku spowodowało wzrost intensywności wiązki w obszarze pomiędzy soczewką a ogniskiem. Taka soczewka umieszczona przed głowicą działa jak szkło powiększające. Obszar badany jest bardzo mały, natomiast jego szczegóły (np. występujące wady) są powiększone.

Soczewki akustyczne zaprojektowane są podobnie jak optyczne. Mogą być wykonane z różnych materiałów. Do najczęściej stosowanych należą PMM (polimetakrylan metylu), PS (polistyren), żywice epoksydowe, aluminium i magnez. Do najważniejszych własności takich materiałów należą:

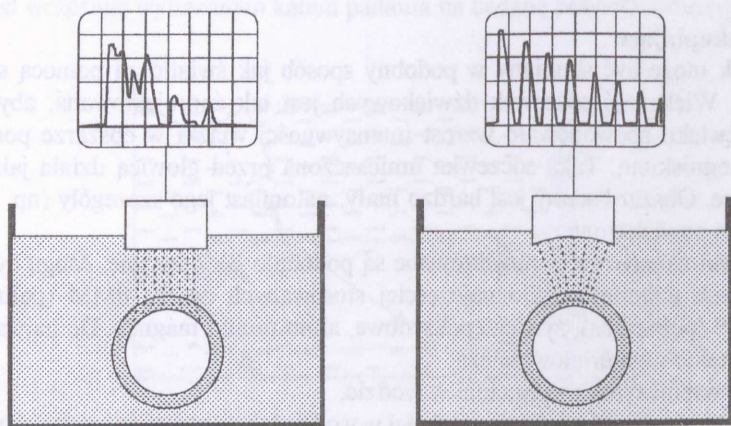
- duży współczynnik załamania w wodzie,
- impedancja akustyczna zbliżona do tej w wodzie lub do elementu piezoelektrycznego,
- małe wewnętrzne tłumienie dźwięku,
- łatwość przetworzenia.

Soczewki akustyczne mają tak zaprojektowaną geometrię, że cała wiązka pada na badaną powierzchnię pod kątem prostym.

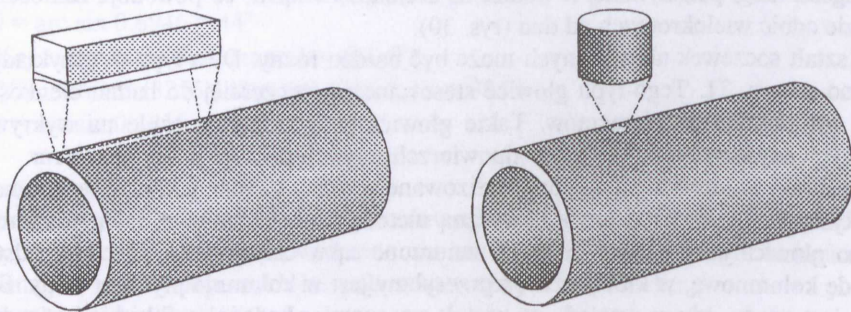
Na przykład przy badaniach rur głowicą normalną, wąską, rozbieżną wiązką jest zalecana do badań wewnętrznych, a wąska zbieżna wiązka do badań zewnętrznych. W innym przypadku bowiem, kiedy mamy głowicę płaskoczołową, wtedy występują naturalne różnice w długości drogi pokonywanej w wodzie na szerokości wiązki, co powoduje zakłócenia w obrazie odbić wielokrotnych od dna (rys. 30).

Kształt soczewek akustycznych może być bardzo różny. Dwa typowe przykłady pokazano na rys. 31. Tego typu głowice stosowane są najczęściej do badań cienkościennych rur i okrągłych elementów. Takie głowice są szczególnie czułe na wykrywanie drobnych powierzchniowych lub podpowierzchniowych pęknięć w ściankach rur.

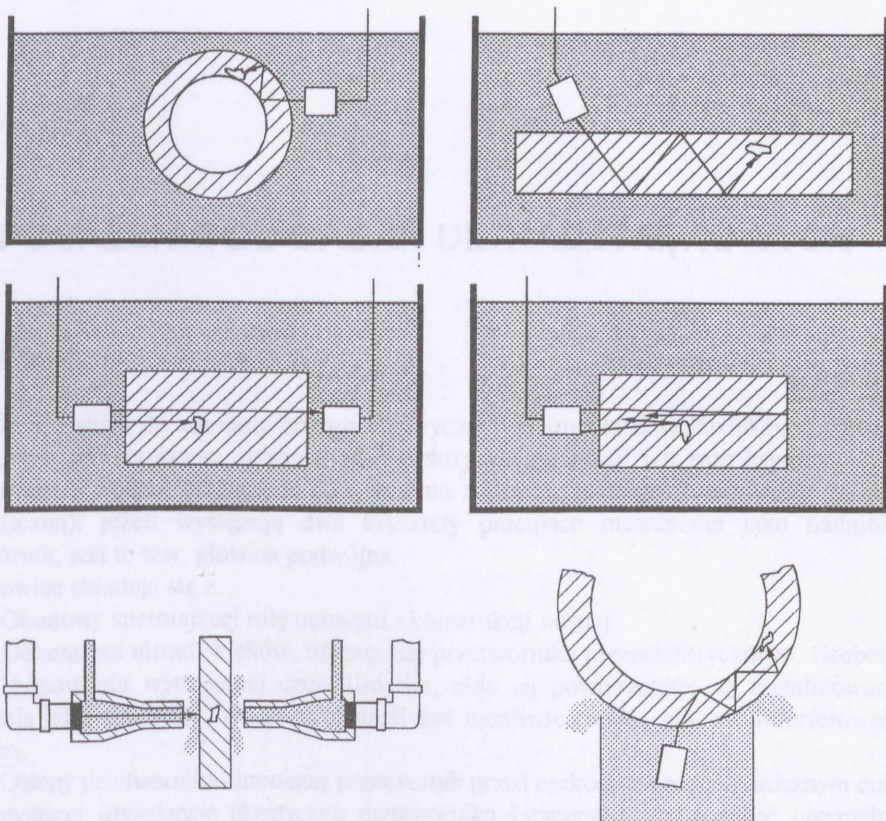
Techniki immersyjne mogą być realizowane w różny sposób, jak to pokazano na rys. 32. Rysunek 32a-d przedstawia klasyczną metodę immersyjną, tzn. taką, w której zarówno głowica jak i badany element zanurzone są w cieczy. Rys. 32e, f przedstawia metodę kolumnową, w której dźwięk przesyłany jest w kolumnie płynącej wody. Stosowana jest wtedy, gdy ze względu na kształt czy rozmiar badanej próbki nie jest możliwe zastosowanie klasycznej metody zanurzeniowej. W metodzie tej wiązka dźwięku kierowana jest na badaną próbkę poprzez warstwę wody wypuszczanej z głowicy na badany element. Dźwięk może być kierowany zarówno prostopadle jak i pod kątem do badanej powierzchni.



Rys. 30. Obraz na ekranie defektoskopu powstający przy badaniu metodą zanurzeniową rur z wykorzystaniem: a – zwykłej głowicy normalnej, b – głowicy soczewkowej



Rys. 31. Obszar badany dla różnych typów głowic soczewkowych: a – z obszarem badania prostokątnym, b – z obszarem badania kołowym



Rys. 32. Techniki stosowane w badaniach immersyjnych

ROZDZIAŁ III

WYPOSAŻENIE DO BADAŃ ULTRADŹWIEKOWYCH

3.1. Głowice

Głowice służą do zamiany energii elektrycznej na impuls ultradźwiękowy, najczęściej przez wykorzystanie zjawiska piezoelektrycznego. Jeżeli ten sam kryształ służy jako nadajnik i odbiornik, mamy do czynienia z głowicą jednoprzetwornikową (monokrystaliczną), jeżeli występują dwa kryształy pracujące niezależnie jako nadajnik i odbiornik, jest to tzw. głowica podwójna.

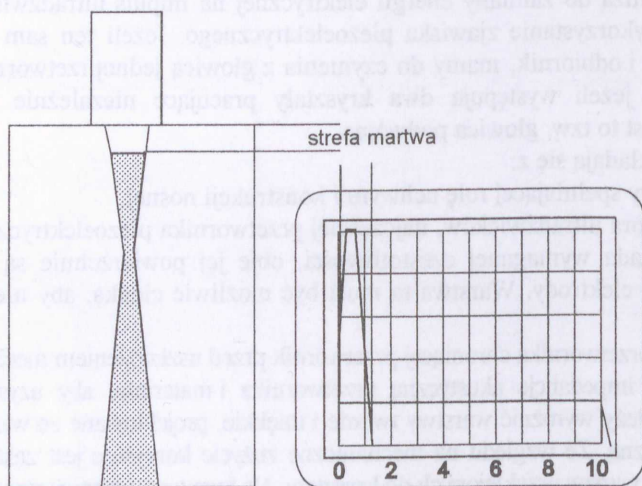
Głowice składają się z:

1. Obudowy spełniającej rolę uchwytu i konstrukcji nośnej.
2. Generатора ultradźwięków, najczęściej przetwornika piezoelektrycznego. Grubość płytki odpowiada wymaganej częstotliwości, obie jej powierzchnie są metalizowane i działają jako elektrody. Warstwa ta musi być możliwie cienka, aby nie interferowała z płytką.

3. Osłony przetwornika chroniącej przetwornik przed uszkodzeniem mechanicznym oraz dopasowującej impedancję akustyczną przetwornika i materiału, aby uzyskać optymalne sprzężenie. Należy wyróżnić warstwy twarde i miękkie, projektowane ze względu na impedancję akustyczną. Ze względu na mechaniczne zużycie korzystne jest zastosowanie cienkich, twardych warstw przyklejonych do kryształu. Na tego typu warstwy stosowane są tlenek aluminium, szafir, węglik boru czy kwarc. Miękkie warstwy ochronne składają się z dopasowanej warstwy ochronnej z żywicy i są odpowiednie w badaniach zanurzeniowych, gdzie nie występuje bezpośredni kontakt z badaną próbką lub przy badaniach kontaktowych z użyciem wymiennych osłonek z tworzywa. W badaniach zanurzeniowych, należy pamiętać, że głowica powinna być wodoszczelna, gdyż niektóre materiały piezoelektryczne mogą być rozpuszczalne w wodzie.

4. Masy tłumiącej, która tłumí drgania własne przetwornika oraz wytłumia niepożądane fale trafiające do głowicy. Stanowi ona także dodatkowe, mechaniczne wzmocnienie przetwornika narażonego na nagłe uderzenia w czasie pracy. Mechaniczne połączenie kryształu z warstwą ochronną i masą tłumiącą odgrywa bardzo ważną rolę. Powierzchnia musi być płaska i gładka, a grubość warstwy klejącej możliwie cienka, aby uniknąć w niej drgań. Impedancja akustyczna masy tłumiącej musi być tak dobrana, aby zapewnić wymagany stopień tłumienia. Najlepszy efekt osiąga się, jeżeli impedancje masy tłumiącej i kryształu są równe, gdyż w tym przypadku cała energia akustyczna fali wstecznej jest absorbowana bez odbicia. Aby stłumić wszelkie odbicia od tylnej ścianki masy tłumiącej, musi ona mieć odpowiednio duży współczynnik tłumienia i grubość. Najlepsze wyniki osiąga się przy zastosowaniu mieszaniny żywicy i drobnego proszku metalicznego wolframu.

Dobra głowica z jednej strony powinna charakteryzować się wysoką czułością wykrycia wad przy dużych odległościach, lecz z drugiej strony powinna mieć także dobrą rozdzielczość przy wykrywaniu reflektorów podpowierzchniowych. Jeżeli zgodnie z pierwszym wymaganiem mamy głowicę z największą możliwą średnicą i najwyższą praktycznie częstotliwością, wtedy tylko obniżenie tłumienia może spowodować dalszy wzrost czułości. Będzie to się jednak kłócić z wymaganiami odnośnie rozdzielczości, ponieważ dłuższy impuls wytwarza dłuższą strefę martwą w obszarze pod powierzchnią przyłożenia głowicy. Strefa martwa powoduje, że małe nieciągłości tuż pod powierzchnią nie mogą być wykryte, ponieważ echo od wady jest przykryte na ekranie impulsem początkowym, rys. 33. Długość tej strefy zależy zarówno od głowicy jak i aparatu.



Rys. 33. Strefa martwa przy badaniu głowicą normalną

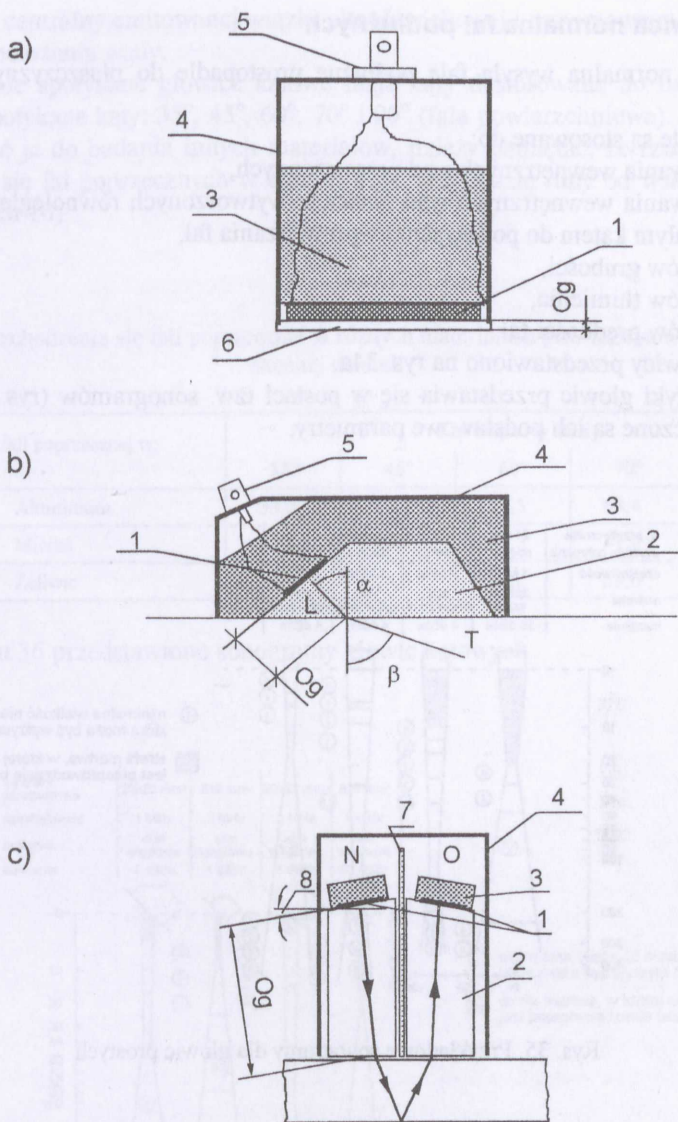
Odsunięcie przetwornika od powierzchni przyłożenia powoduje tzw. *opóźnienie głowicy* (odległość O_g na rys. 34).

Dla danego materiału piezoelektrycznego można skonstruować głowice zapewniające zaspokojenie tylko jednego z powyższych wymagań.

Schematyczną budowę różnych typów głowic przedstawiono na rys. 34.

Rodzaj głowicy określamy przez rodzaj wzbudzanych fal, kąt załamania wiązki oraz kształt wiązki fal. Najważniejsze parametry głowic to: częstotliwość drgań, wymiary przetwornika, kąt załamania wiązki, długość pola bliskiego, kąt rozbieżności wiązki, szerokość wiązki (tzw. charakterystyki głowic). Do najczęściej spotykanych typów głowic należą:

- głowice pojedyncze – głowice normalne (głowice proste) fal podłużnych,
- głowice pojedyncze skośne – fal poprzecznych,
- głowice podwójne fal podłużnych,
- pojedyncze głowice fal powierzchniowych.



Rys. 34. Budowa głowic ultradźwiękowych: a – głowica normalna, b – głowica kątowa, c – głowica podwójna; 1 – przetwornik piezoelektryczny, 2 klin załamujący z PMM, 3 – masa tłumiąca, 4 – obudowa, 5 – gniazdo podłączeniowe, 6 – osłona przetwornika, 7 – ścianka izolująca, 8 – kąt dachowy; Og – opóźnienie głowicy

3.1.1. Głowica normalna fal podłużnych

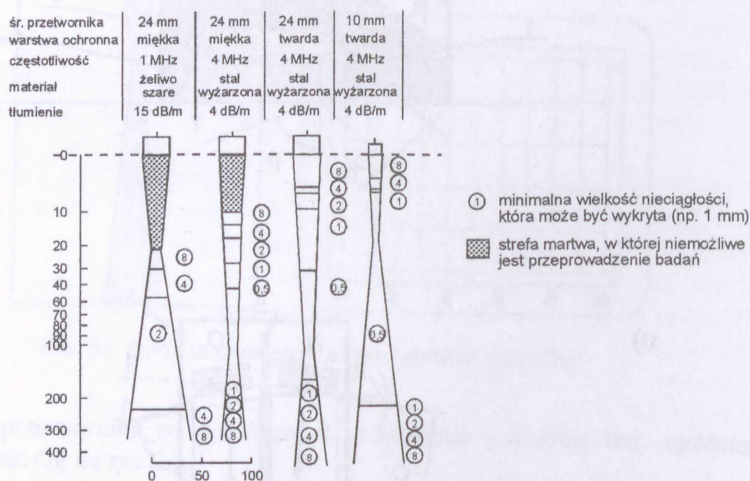
Głowica normalna wysyła fale podłużne prostopadle do płaszczyzny przyłożenia głowicy.

Głowice te są stosowane do:

- wykrywania wewnętrznych wad przestrzennych,
- wykrywania wewnętrznych wad płaskich, wytworzonych równolegle lub nachylnych pod małym kątem do powierzchni wprowadzania fal,
- pomiarów grubości,
- pomiarów tłumienia,
- pomiarów prędkości fal.

Schemat głowicy przedstawiono na rys. 34a.

Charakterystyki głowic przedstawia się w postaci tzw. sonogramów (rys. 35), na których umieszczone są ich podstawowe parametry.



Rys. 35. Przykładowe sonogramy dla głowic prostych

3.1.2. Głowica skośna fal poprzecznych

W głowicach tych wykorzystuje się zazwyczaj zjawisko transformacji fali podłużnej na granicy ośrodków. Budowa takiej głowicy przedstawiona jest na rys. 34b.

W większości zastosowań praktycznych stosuje się głowice o wstępnie ustalonym kącie fali poprzecznej. Zawierają one klinowy blok pośredni, na którym umocowany jest kryształ. Czasami wykorzystuje się standardowe głowice proste z przymocowanym wymiennym klinem, który określa kąt fali w badanej próbce. Można go po zużyciu wymienić. Na obudowie głowicy często zaznaczony jest tzw. środek głowicy, który

określa punkt centralny emitowanej wiązki ultradźwiękowej i przyjmowany jest on przy obliczeniach położenia wady.

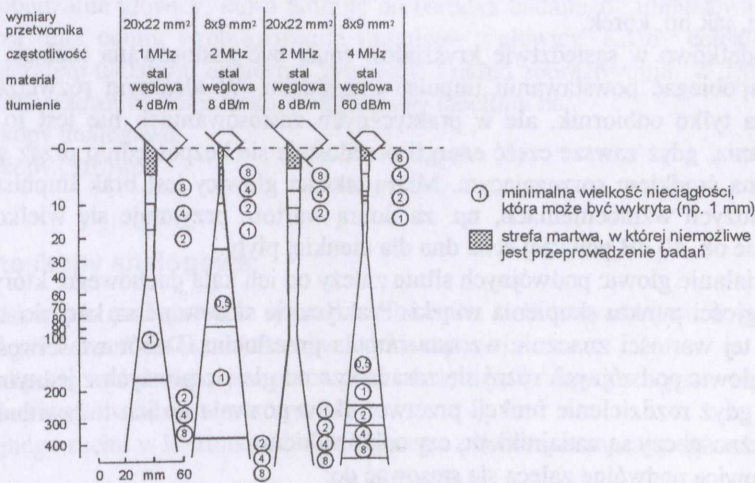
Powszechnie spotykane głowice kątowe mają kąty dostosowane do badania stali. Najczęściej spotykane kąty: 35°, 45°, 60°, 70° i 90° (fala powierzchniowa). Jeżeli chcemy zastosować je do badania innych materiałów, należy pamiętać, że rzeczywisty kąt rozchodzenia się fal poprzecznych w danym materiale będzie inny od wskazanego na głowicy (tablica 10).

Tablica 10

Zmiana kąta rozchodzenia się fali poprzecznej w różnych materiałach przy zastosowaniu głowicy skośnej do stali

Kąt wiązki fali poprzecznej w:	Kąt wiązki w stali				
	35°	45°	60°	70°	80°
Aluminium	33,0	42,4	55,5	63,4	69,6
Miedzi	23,6	29,7	37,3	41,0	43,4
Żeliwie	23,0	28,0	35,0	39,0	41,0

Na rysunku 36 przedstawiono sonogramy głowic kątowych



Rys. 36. Przykładowe sonogramy dla głowic kątowych

Następnym problemem, jaki może pojawić się w przypadku głowic kątowych, jest zjawisko częściowego odbicia fali na powierzchni styku. Fala ulega ponownemu odbiciu w obrębie klina i wraca do kryształu. Te odbicia powodują wydłużenie strefy martwej i podstawowym sposobem uniknięcia tego jest użycie materiału o stosunkowo wysokiej absorpcji, jak np. PMM (polimetakrylan metylu). Ponadto wszystkie wolne powierzchnie klina powinny być pokryte warstwą absorbującą tworzącą akustyczną otoczkę. Wykonuje się je z żywicy z wypełniaczami albo z twardej gumy. Głowice kątowe stosuje się do:

- wykrywania wad wewnętrznych o kształtach przestrzennych,
- wykrywania wad płaskich usytuowanych skośnie do powierzchni wprowadzania fal,
- wykrywania wad wewnętrznych tworzących naroża z powierzchnią badaną.

3.1.3. Głowica podwójna fal podłużnych

Charakterystyczną cechą budowy głowic podwójnych, fal podłużnych jest rozdzielanie funkcji (rys. 34c) przetwornika na nadajnik i odbiornik. Dwa przetworniki, najczęściej półkolistego kształtu przykleja się do wkładek z PMM i bardzo starannie odseparowuje od siebie zarówno elektrycznie jak i akustycznie. Zamontowane są we wspólnej obudowie i podłączone do defektoskopu podwójnym kablem.

Droga impulsu dźwiękowego ze względu na pewien kąt, pod jakim wprowadzana jest wiązka, jest dłuższa niż grubość próbki. Ten tzw. błąd obejścia jest cechą charakterystyczną tego typu głowic i musi być skompensowany w czasie kalibracji głowicy.

Warstwa rozdzielająca strefę nadajnika i odbiornika musi odznaczać się bardzo dużą zdolnością tłumienia ultradźwięków i zazwyczaj wykonywana jest z materiałów porowatych, jak np. korek.

Dodatkowo w sąsiedztwie kryształów musi być zastosowana izolacja elektryczna, aby zapobiegać powstawaniu impulsu przesłuchu. W idealnym rozwiązaniu dźwięki odbiera tylko odbiornik, ale w praktycznych zastosowaniach nie jest to możliwe do uzyskania, gdyż zawsze część energii przedostaje się bezpośrednio przez szczelinę wypełnioną środkiem sprzęgającym. Miara jakości głowicy jest brak impulsu przesłuchu przy dużych wzmocnieniach, np. za dobrą wartość przyjmuje się wielkość leżącą w zakresie ok. 40 dB powyżej echa dna dla cienkiej płyty.

Działanie głowic podwójnych silnie zależy od ich kąta dachowego, który to decyduje o odległości punktu skupienia wiązki. Praktycznie stosowane są kąty do 12°, gdyż powyżej tej wartości znacznie wzrasta impuls przesłuchu. Dobór właściwości elektrycznych głowic podwójnych różni się zasadniczo od głowic prostych z jednym przetwornikiem, gdyż rozdzielanie funkcji przetworników pozwala na ich indywidualne dobranie w zależności czy są nadajnikiem, czy odbiornikiem.

Głowice podwójne zaleca się stosować do:

- wykrywania wad podpowierzchniowych,
- wykrywania małych wad na głębokościach odpowiadających długości ogniskowej,
- pomiaru grubości elementów cienkościennych, szczególnie w przypadku skorodowanych tylnych powierzchni kotłów i rur lub do wykrywania pittingu w rurach, co byłoby niemożliwe do zbadania standardowymi głowicami jednoprzetwornikowymi.

Dokładność pomiaru wynosi 0,1 mm przy grubościach ścianek 0,3 mm i większych. Możliwe są także pomiary na gorących powierzchniach do ok. 500°C.

3.1.4. Głowice fal powierzchniowych

Są to głowice skośne (o takiej samej budowie) z klinem załamującym z PMM, z tak dobranym kątem padania na granicę ośrodków PMM/stal, że występuje wówczas całkowity zanik fal podłużnych i poprzecznych w badanym materiale, a jedynie pozostaje fala powierzchniowa.

Głowice te zaleca się stosować do:

- wykrywania wad leżących na powierzchni,
- wykrywania wad leżących blisko powierzchni badania [0,5 do 1,5 mm],
- wykrywania wad wychodzących na powierzchnię.

3.2. Defektoskopy

Stosowanie fali ciągłej przy badaniach ultradźwiękowych uniemożliwia zmierzenie czasu, w jakim fala przebiega drogę od źródła do powierzchni odbijającej i z powrotem, gdyż nie można wówczas ustalić żadnego punktu fali służącego za podstawę takiego pomiaru. Trudność tę usuwa się stosując impulsy fal. Wtedy takim wyróżnionym punktem staje się czoło impulsu, którego bieg w materiale można stosunkowo łatwo obserwować. W ultradźwiękowej technice pomiarowej rozpowszechnione są przyrządy impulsowe zwane defektoskopami. Charakterystyczną cechą defektoskopu impulsowego jest krótkie pobudzenie głowicy, która emituje do ośrodka badanego „impulsową” falę ultradźwiękową oraz odbiór i zobrazowanie impulsów z głowicy. Każdy defektoskop impulsowy ma zatem nadajnik, odbiornik impulsów i układ zobrazowania. W zależności od układu zobrazowania defektoskopy impulsowe dzielimy na:

- defektoskopy analogowe,
- defektoskopy cyfrowe.

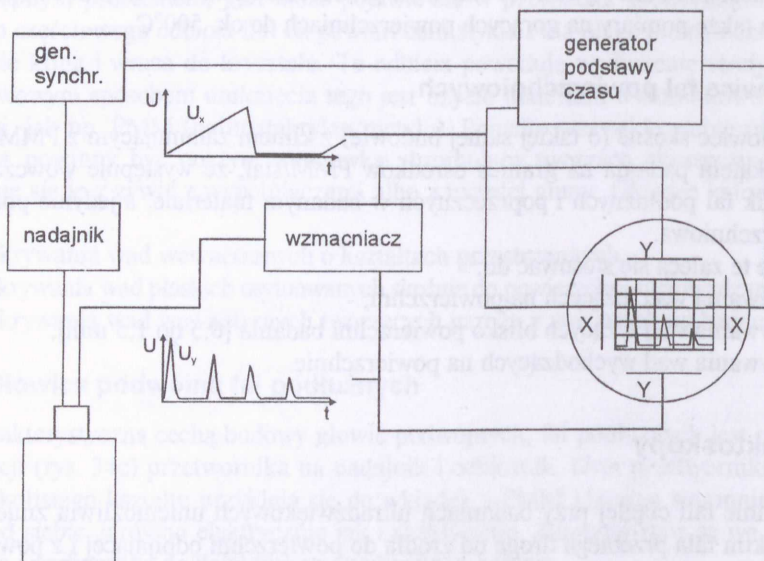
3.2.1. Defektoskopy analogowe

W defektoskopach analogowych sygnał z odbiornika zobrazowany jest w postaci wykresu „napięcie – czas” na ekranie lampy oscyloskopowej.

Obraz na ekranie wyświetlany jest przez punkt świetlny, którego ruch jest wynikiem nałożenia dwóch ruchów składowych (rys. 37):

- jednostajnego ruchu w kierunku X wynikającego z liniowo narastającego w czasie napięcia U_x ,
- ruchu w kierunku Y – ruch plamki wynika z chwilowej wartości sygnału U_y z głowicy.

Przebieg napięcia U_x określony jest przez generator podstawy czasu. Czas trwania liniowo narastającej części napięcia U_x wynika z zakresu pola obserwacji.



Rys. 37. Schemat blokowy defektoskopu analogowego

Praca defektoskopu jest cykliczna, cykl rozpoczyna się w momencie podania impulsu przez generator impulsów synchronicznych, który to impuls ponawiany jest z określoną częstotliwością powtarzania. Im wyższa jest ta częstotliwość, tym mamy jaśniejszy obraz na ekranie, ale trzeba ją dobrać na tyle niską, aby umożliwić zniknięcie wszystkich ech wielokrotnych przed następnym cyklem pracy. Jeżeli wartość ta będzie zbyt duża, to opóźnione echa będą widoczne na ekranie jako tzw. fantomy. Aby obraz na ekranie był stabilny (nie migający) i dostatecznie jaskrawy, plamka musi odwzorowywać sygnał cyklicznie, kilkadziesiąt do kilku tysięcy razy na sekundę.

Równocześnie z podaniem impulsu uruchamiany jest nadajnik, który pobudza silnym i krótkim impulsem elektrycznym głowicę nadawczą do drgań i równocześnie punkt świetlny rozpoczyna swój ruch poziomy na ekranie na skutek uruchomienia generatora podstawy czasu.

W momencie trafienia na reflektor wiązka ultradźwiękowa ulega odbiciu i pada na głowicę. Impuls ten rejestrowany jest przez odbiornik podłączony do płytek odchylenia pionowego Y. Następuje odchylenie punktu świetlnego na ekranie stanowiące obraz reflektora. W ten sposób powstaje na ekranie lampy wykres we współrzędnych napięcie-czas. W lampach oscyloskopowych do pełnego odchylenia plamki w kierunku X lub Y potrzebne są napięcia rzędu 50-200V. Pochodzące od wad sygnały z głowicy zawierają się w przedziale kilkudziesięciu μV do kilku V (w zależności od rozmiaru wady, odległości od głowicy, usytuowania względem wiązki itd.). Tak duża rozpiętość amplitud sygnału powoduje konieczność regulacji wzmacnienia w szerokim zakresie (jeden do kilkanaście tysięcy razy).

Wzmacniacz odbiornika jest zawsze wyposażony w skokowy przełącznik wzmocnienia wyskalowany w decybelach (dB), który umożliwia ustalenie odpowiedniej wysokości echa na ekranie lampy – zarówno dla małych jak i silnych sygnałów z głowicy.

Aparaty analogowe wyposażone są w kilka kontrolerów wzmocnienia umożliwiających ustawianie zgrubne o kroku 20 dB, dokładne o mniejszym kroku (1-2 dB), a niekiedy również ciągle.

Załóżmy, że $H(1)$ jest wysokością echa odniesienia, a $H(2)$ jest wysokością echa badanej wady. Różnica w wysokości tych ech ΔH określona jest następującym wzorem:

$$\Delta H = 20 \cdot \log \left(\frac{H(2)}{H(1)} \right)$$

np. $H(1) = 80\%$ i $H(2) = 40\%$ wysokości ekranu to:

$$\Delta H = 20 \cdot \log \left(\frac{H(2)}{H(1)} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{40}{80} \right) = -6 \text{ dB}$$

Oznacza to, że echo $H(2)$ jest o 6 dB powyżej echa $H(1)$. Skala decybelowa (dB) jest skalą logarytmiczną, odniesioną do dwóch wartości pomiarowych, powszechnie stosowaną w wielu dziedzinach. Zaletami tej skali są:

– bardzo duże stosunki, które można zapisać małymi liczbami, np.:

$$10/1 = +20 \text{ dB}$$

$$100/1 = +40 \text{ dB}$$

$$1000/1 = +60 \text{ dB}$$

$$10000/1 = +80 \text{ dB}$$

– stosunki odwrotne wyrażane tylko zmianą znaku, np.:

$$1000/1 = +60 \text{ dB}$$

$$1/1000 = -60 \text{ dB}$$

Różnica wzmocnienia ΔW , podana w dB a niezbędna do ustawienia różnych ech (dla oceny wielkości wady) na tej samej wysokości np. 80% wysokości ekranu, opisana jest zależnością

$$\Delta W = -\Delta H$$

Oznacza to, że jeżeli oszacowywane echo np. $H(2) = 40\%$ jest 6 dB poniżej echa odniesienia, $H(1) = 80\%$, wtedy wzmocnienie musimy zwiększyć o 6 dB, aby ustawić echo z 40% na 80% wysokości ekranu. W większości przypadków różnicę wzmocnienia łatwo obliczyć stosując metodę jak w poniższym przykładzie. Najpierw należy rozłożyć współczynnik wzmocnienia na szereg prostych współczynników, tj.:

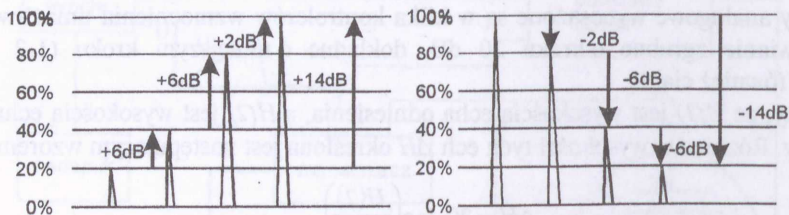
$$8 \text{ dB} = (6+6+6) \text{ dB, wsp. wzmocnienia } 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$$

$$2 \text{ dB} = (20-18) \text{ dB } 10/8 = 1,25$$

$$14 \text{ dB} = (20-6) \text{ dB } 10/2 = 5$$

$$\text{Współczynnik wzmocnienia } 625 = 5 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 1,25 = (14+20+20+2) \text{ dB} = 56 \text{ dB}$$

Kształt impulsu przedstawiany na ekranie najczęściej nie odpowiada rzeczywistemu obrazowi impulsu wysyłanego lub odbieranego przez przetwornik. Jest on efektem przetworzenia elektronicznego.



Rys. 38. Różnice wzmocnienia w decybelach

Rzeczywisty impuls ma kształt fal gasnących złożonych z określonej ilości pojedynczych drgań. Gdy taki impuls powróci do odbiornika, wytwarza impuls elektryczny wysokiej częstotliwości, który odzwierciedla przebieg impulsu ultradźwiękowego. Tylko impuls elektryczny może być dalej elektronicznie przekształcony. W pierwszym etapie impuls ten jest prostowany. Można to przeprowadzić na trzy sposoby (rys. 39):

- prostowanie dodatniopółkowe,
- prostowanie ujemnopółkowe,
- prostowanie pełnofalowe.

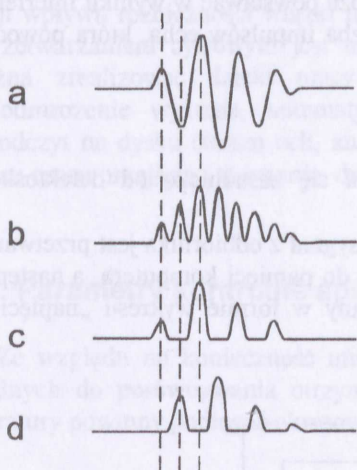
Wybór określonego sposobu prostowania zależy od typu urządzenia, ale ma raczej znaczenie drugoplanowe dla praktyki badań ultradźwiękowych.

Prostowanie półkowe jest zalecane, gdy chcemy zmierzyć czas przejścia impulsu lub do bardzo dokładnych pomiarów grubości. Wybór polaryzacji (ujemna lub dodatnia) będzie zależał od własności głowicy i reflektora i powinien być określony doświadczalnie. Czasami faza echa może zostać zmieniona zależnie od tego czy reflektor jest akustycznie bardziej miękki czy twardszy od otaczającego go materiału.

Prostowanie pełnofalowe jest korzystne przy ocenie amplitudy echa, ponieważ daje obraz niezależny od przesunięcia fazowego. Pełne wyświetlenie bez prostowania stosowane jest do pomiaru częstotliwości głowicy, ale umożliwiają to tylko wyższej klasy aparaty.

Po prostowaniu impuls poddawany jest dalej wygładzaniu i filtrowaniu, co powoduje, że w efekcie otrzymujemy na ekranie tylko obwiednię impulsu, na której poszczególne składowe widoczne są jako „stopnie” na linii obrysu. Sygnał widoczny jest więc w postaci skokowo narastającego zbocza impulsu.

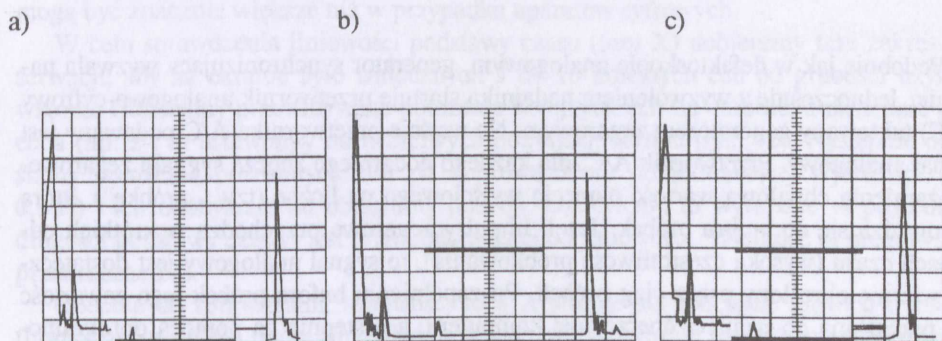
Dla pewnych pomiarów, w których wielkość amplitudy echa odgrywa ważną rolę (najczęściej nie może być większa od pewnej wielkości granicznej), są zainstalowane w układzie elektronicznym aparatu dodatkowe obwody, tzw. bramki. Zwalniają one operatora od ciągłej obserwacji ekranu, umożliwiając sygnalizację dźwiękową w przypadku przekroczenia (lub nie – opcjonalnie) pewnego zadanego progu amplitudy lub zakresu głębokości.



Rys. 39. Różne sposoby przetworzenia impulsu elektrycznego: a – impuls nie modyfikowany, b – prostowanie pełnofalowe, c – prostowanie dodatniopółkowe, d – prostowanie ujemnopółkowe

Wyjście wzmacniacza jest podłączone do dodatkowego obwodu porównującego, w którym sygnał jest porównywany z zadanym progiem napięcia. Zarówno próg napięciowy jak i pozycja czy szerokość bramki na ekranie mogą być zmieniane stanowią elektryczny układ wskazujący.

W niektórych aparatach można spotkać dwie takie bramki. Do pokazania bramki i jej wysokości (próg bramki) na ekranie stosowane są różne metody. W prostych aparatach, które mają stały próg, pozycja bramki zaznaczona jest na linii podstawy czasu – rys. 40a. W aparatach ze zmiennym progiem, pozycja bramki i jej wysokość na ekranie są wskazywane prostą linią – rys.40b. Czasami stosowane są jednocześnie dwa sposoby – rys.40c.



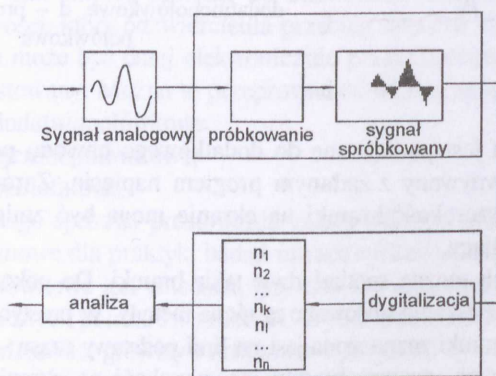
Rys. 40. Różne sposoby przedstawienia bramki na ekranie defektoskopu: a – próg na linii podstawy czasu, b – linia prosta, c – oba sposoby

Alarm bramki może być wyzwalany w postaci dźwięku lub wizualnie światłem lampki kontrolnej. Wiele aparatów ma zabezpieczenie zapobiegające wyzwalaniu alarmu z powodu pojedynczego impulsu echa, który może powstawać w wyniku interferencji elektrycznej. W takim przypadku całkowita liczba impulsów echa, która powoduje wyzwalanie alarmu jest określona wcześniej.

3.2.2. Defektoskopy cyfrowe

Defektoskop z przetwarzaniem cyfrowym różni się zasadniczo od defektoskopu analogowego układem zobrazowania.

W defektoskopach z przetwarzaniem cyfrowym sygnał z odbiornika jest przetwarzany na ciąg liczb (próbek) – rys. 41 – wpisywanych do pamięci komputera, a następnie dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu wyświetlany w formie wykresu „napięcie – czas” na ekranie monitora.



Rys. 41. Przekształcenie sygnału analogowego w sygnał cyfrowy

Podobnie jak w defektoskopie analogowym, generator synchronizujący wyzwała nadajnik. Jednocześnie z wyzwoleniem nadajnika startuje przetwornik analogowo-cyfrowy (A/C) taktowany generatorem zegarowym. Na wejście przetwornika A/C podawany jest sygnał analogowy. Przetwornik A/C, dla każdego dodatniego zbocza sygnału zegarowego, zamienia chwilową wartość napięcia wyjściowego na liczbę (tzw. „próbkę”), którą wprowadza się do bufora próbek. Jeżeli impulsy zegarowe przychodzą w krótkich odstępach czasu (wysoka częstotliwość próbkowania), to sygnał analogowy jest dostatecznie wiernie określony przez ciąg próbek. Po zapełnieniu bufora próbek jego zawartość jest przesyłana do pamięci operacyjnej komputera, a następnie za pomocą oprogramowania wyświetlona na ekranie monitora w postaci wykresu „napięcie-czas”.

Komputer oprócz przyjmowania próbek i rysowania wykresów nadzoruje pracę całego defektoskopu. Między innymi ustawia parametry nadajnika i odbiornika (np. wzmocnienie, podcięcie, szerokość i amplitudę impulsu nadawczego) a także położenie

komutatora i przełącznika głowic. Niektóre defektoskopy mają wbudowaną dodatkową korekcję wzmocnienia w funkcji czasu, np. dla kompensacji tłumienia ośrodka, eliminacji wpływu rozbieżności wiązki fal na poziomie ech itp. Istotną zaletą defektoskopu z przetwarzaniem cyfrowym jest to, że wiele funkcji pomiarowych i pomocniczych można zrealizować dzięki pracy w środowisku komputerowym, np. zamrożenie/odmrożenie wykresu, automatyczne pomiary amplitudy i odległości ech, zapis/odczyt na dysku obrazu ech, analizę widmową impulsów, korelacyjne metody pomiaru czasu przejścia i tłumienia, drukowanie itd.

3.3. Parametry kontrolne aparatury ultradźwiękowej

Ze względu na konieczność utrzymywania stałych warunków pomiarowych, niezbędnych do porównywania otrzymywanych wyników badań, parametry stosowanej aparatury powinny podlegać okresowej kontroli.

3.3.1. Parametry defektoskopu

Do podstawowych parametrów kontrolnych defektoskopów zaliczamy:

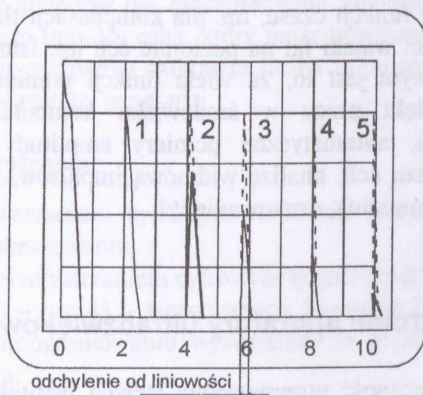
- a) charakterystykę toru X,
- b) charakterystykę toru Y,
- c) dynamikę zobrazowania.

Charakterystyka toru X

Parametr ten ma bardzo duży wpływ na określanie położenia wady. Sprawdzanie go jest szczególnie ważne dla defektoskopów analogowych, gdzie odchylenia od liniowości mogą być znacznie większe niż w przypadku aparatów cyfrowych.

W celu sprawdzenia liniowości podstawy czasu (toru X) dobieramy taki zakres obserwacji, aby na ekranie było widocznych 5 do 10 kolejnych ech od grubości użytego wzorca. Obliczamy przewidywane położenie kolejnych ech na ekranie, a następnie dwa echa (np. 2 i 8) ustawiamy na właściwych pozycjach ekranu (rys. 42). Następnie określamy położenie pozostałych ech po doprowadzeniu do jednakowej wysokości (np. 0,8 H) i ich odchylenie od obliczonej pozycji. Odchylenie to wyrażone w procentach długości podstawy czasu i jest miarą odchylenia od liniowości. Wielkość ta nie powinna przekraczać 2%.

Obecnie do sprawdzania liniowości toru X stosuje się specjalne głowice o małym tłumieniu (np. N23), które umożliwiają uzyskanie na ekranie układu ech o zbliżonych wysokościach i szybkiego określenia odległości między nimi.



Rys. 42. Określanie liniowości toru X

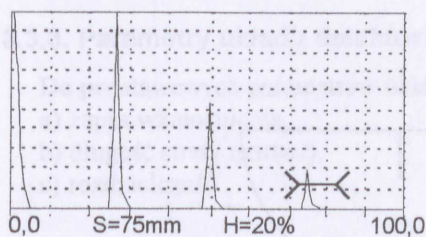
Liniowość toru Y

Drugim ważnym parametrem jest liniowość toru Y. Odchylenie od liniowości ma wpływ na dokładność odchylenia wielkości wady.

W celu zbadania liniowości, dla zakresu obserwacji przekraczającego kilkakrotnie grubość wzorca użytą do badań, wybieramy dowolne echo i ustawiamy je na pełną wysokość ekranu. Odczytujemy odpowiadający temu ustawieniu poziom wzmocnienia. Następnie zmniejszając stopniowo wzmocnienie np. o 2 dB odczytujemy każdorazowo odpowiadającą temu wysokości echa w procentach wysokości ekranu. Miarą odchylenia od liniowości jest wyrażona w procentach odchyłka zmierzonych wysokości ech od teoretycznych wysokości obliczonych dla 2-decybelowego spadku wzmocnienia. Odchylenie toru Y od liniowości nie powinno przekraczać 5%.

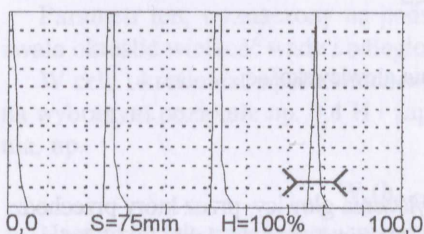
Dynamika zobrazowania

Parametr ten pozwala określić, jaką wykrywalność wad ma nasz aparat, tzn. jaki jest zakres amplitudy impulsu, który możemy obserwować bez przesterowania aparatu lub niedopuszczalnego zniekształcenia. Dynamikę zobrazowania możemy określać jako wielkość wzmocnienia potrzebną, aby echo o wysokości początkowej $0,2 H$ zwiększyć do wysokości H (rys. 43) lub echo o wysokości początkowej $0,05 H$ do wysokości H . W tym pierwszym przypadku wielkość ta powinna wynosić przynajmniej 14 dB, a w tym drugim 26 dB.



7,5 dB

Ustawiamy dowolne echo na poziomie 0,2 H i odczytujemy wzmacnienie np.
 $W_1 = 7,5 \text{ dB}$



21,5dB

Zwiększamy wzmacnienie, aż wybrane echo osiągnie pełną wysokość ekranu i odczytujemy wartość wzmacnienia, np.
 $W_2 = 21,5 \text{ dB}$

$$DZ = W_2 - W_1 = 14 \text{ dB}$$

Rys. 43. Określanie dynamiki zobrazowania defektoskopu cyfrowego

3.3.2. Parametry głowicy

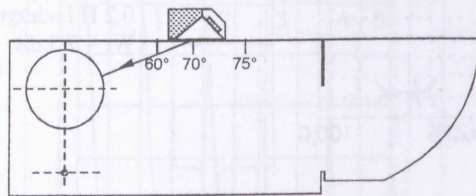
Do podstawowych parametrów głowic skośnych, które wymagają okresowej kontroli, zaliczamy:

- a) kąt załamania głowicy,
- b) środek głowicy (wyprzedzenie głowicy).

Parametry te mogą ulegać zmianie w czasie eksploatacji głowic ze względu na ścieranie się powierzchni kontaktowej głowicy w wyniku tarcia o powierzchnię badanego elementu.

Kontrola kąta załamania głowicy skośnej

W celu kontroli kąta załamania głowicy skośnej posługujemy się wzorcem W1. Głowicę ustawiamy na wzorcu w położeniu jak na rysunku 44. Następnie przesuwamy głowicę aż do uzyskania maksymalnego echa od krążka z PMM we wzorcu. Kąt głowicy odczytujemy z podziałki na wzorcu.

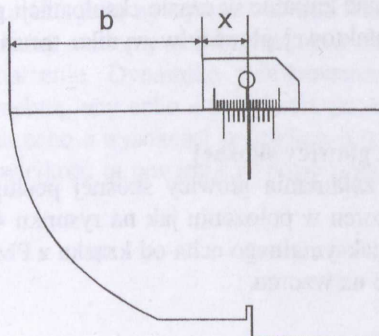


Rys. 44. Kontrola kąta załamania głowicy skośnej

Kontrola środka głowicy skośnej

Środek głowicy jest to punkt na powierzchni przyłożenia głowicy, przez który przechodzi środek wiązki dźwiękowej. Znajomość tej wielkości jest niezbędna do dokładnej lokalizacji wad. W celu wyznaczenia środka głowicy posługujemy się wzorcem W1. Głowicę umieszczamy na wzorcu w pozycji jak na rys. 45. Następnie przesuwamy głowicę do znalezienia maksymalnej wysokości echa odbitego od powierzchni cylindrycznej wzorca. W tym położeniu środek głowicy pokrywa się ze środkiem krzywizny powierzchni odbijającej. Różnicę położenia środka głowicy zaznaczonego przez producenta na powierzchni bocznej głowicy i rzeczywistego środka wyznaczonego w badaniu odczytujemy na skali naniesionej na wzorcu. Możemy się posłużyć także określeniem tzw. *wyprzedzenia głowicy* (wielkość x), czyli odległości powierzchni czołowej głowicy od jej środka. Wielkość tę wyznaczamy mierząc odległość czoła głowicy od krawędzi powierzchni cylindrycznej wzorca b :

$$x = 100 - b.$$



Rys. 45. Wyznaczanie środka głowicy kątowej

3.3.3. Parametry układu defektoskop-głowica

Do podstawowych parametrów układu głowica-defektoskop zaliczamy:

- a) zapas wzmocnienia,
- b) długość strefy martwej,
- c) rozdzielczość.

Zapas wzmocnienia

Parametr ten, wyznaczony na podstawie wykresu OWR (patrz rozdział. 5.1.2), pozwala określić wielkość wady i odległość, z jakiej można ją wykryć.

W celu określenia zapasu wzmocnienia (ZW) ustawiamy pierwsze echo dna wzorca na wybranym poziomie np. 0,4 H i zapisujemy odpowiadającą temu wartość wzmocnienia, np.

$$W_o(h_{g=25} = 0,4 H) = 3,5 \text{ dB}$$

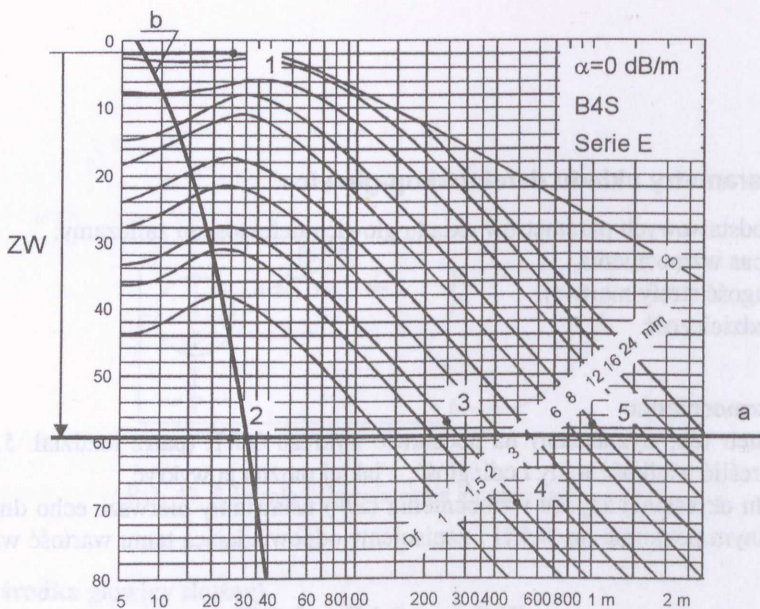
Następnie tak zwiększamy wzmocnienie, aż szумы elektroniczne (tzw. „trawa”) osiągnie na ekranie poziom odpowiadający 0,2 H i odczytujemy odpowiadającą temu wartość wzmocnienia:

$$W_{sz} = 61 \text{ dB}$$

Zapas wzmocnienia jest to różnica rejestrowanych wzmocnień:

$$ZW = W_{sz} - W_o = 61 - 3,5 = 57,5 \text{ dB}$$

Obliczoną wartość nanosimy na wykres OWR (rys. 46). Ponieważ naszym reflekto-rem odniesienia było echo dna wzorca w odległości 25 mm, znajdujemy na wykresie na linii dna punkt dla odległości 25 mm (pkt 1, rys. 46). Od tego poziomu odkładamy wartość wyznaczonego ZW w kierunku wzrastającego wzmocnienia (pkt 2 rys. 46). Linia a na wykresie odcina obszar, który jest niedostępny dla badania naszym układem defektoskop-głowica. Oznacza to, że dla tego układu możemy np. zlokalizować i zmierzyć wadę o wymiarze 2 mm w odległości 250 mm (pkt 3), ale nie możemy tej samej wady zmierzyć z odległości 500 mm (pkt 4), albo, że na przykład z odległości 1 m najmniejsza średnica wady, jaką możemy zmierzyć, to 8 mm (pkt 5).



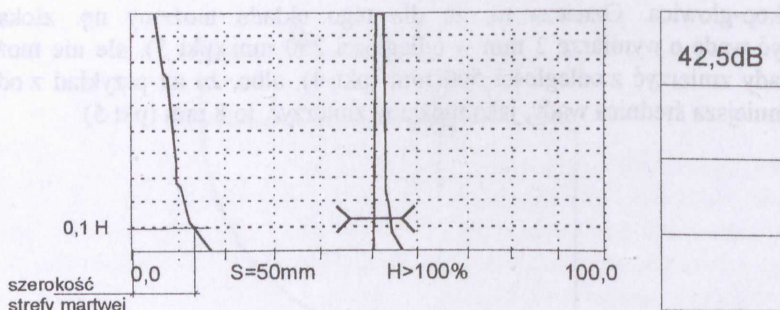
Rys. 46. Nanoszenie zapasu wzmocnienia na wykres OWR

Wielkość strefy martwej

Strefa martwa wpływa na wykrywalność wad podpowierzchniowych. Wielkość strefy martwej jest funkcją wzmocnienia defektoskopu.

Miara strefy martwej jest szerokość impulsu początkowego wyrażonego w milimetrach. Szerokość tę wyznaczamy na wysokości 0,1 H (rys. 47).

Wyznaczając szerokość strefy martwej dla różnych poziomów wzmocnienia, możemy wyznaczyć obszar wykresu OWR niedostępny dla naszych pomiarów ze względu na strefę martwą (linia b na rys. 46).

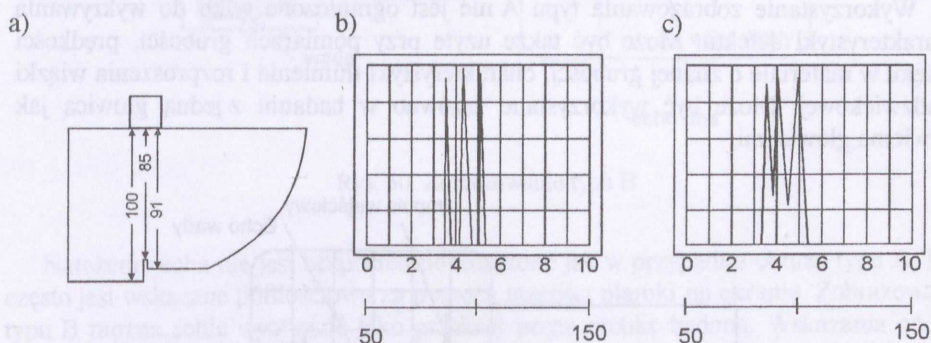


Rys. 47. Kontrola strefy martwej

Rozdzielczość

Przez rozdzielczość rozumiemy zdolność rozróżniania dwóch wad leżących blisko siebie. Rozdzielczość układu aparat-głowica zależy od poziomu wzmocnienia i poziomu podcięcia (stopnia dyskryminacji małych impulsów). Oszacowania rozdzielczości głowicy normalnej można dokonać za pomocą wzorca W1.

Głowicę ustawiamy na wzorcu W1 jak na rysunku 48a. Uważa się, że rozdzielczość układu aparat-głowica jest dostateczna, jeżeli wszystkie trzy echa pochodzące od powierzchni odległych od głowicy o 85, 91 i 100 mm są wyraźnie rozdzielone (rys. 48b). O braku dostatecznej rozdzielczości świadczy obraz jak na rys. 48c.



Rys. 48. Określanie rozdzielczości układu defektoskop-głowica normalna: a – sposób przyłożenia głowicy na wzorcu W1; b – obraz przy prawidłowej rozdzielczości; c – obraz przy niedostatecznej rozdzielczości

3.4. Rodzaje zobrazowania

Informacje uzyskane w badaniach ultradźwiękowych można przedstawić w różnej postaci. Mamy trzy rodzaje zobrazowania: typu A, B i C.

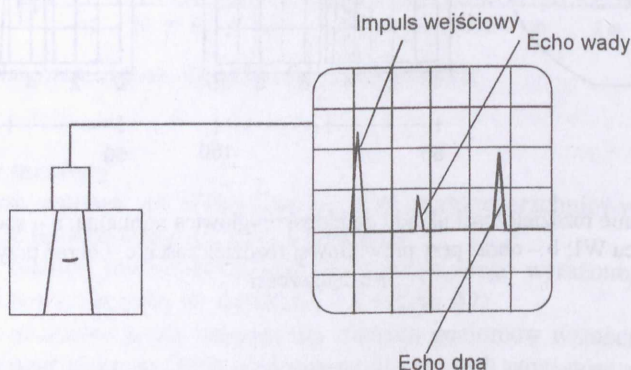
3.4.1. Zobrazowanie typu A

Przedstawia ono ilościową zależność pomiędzy amplitudą sygnału i czasem przejścia, uzyskaną w pojedynczym punkcie powierzchni próbki badanej. Ten typ zobrazowania – najczęściej stosowany – może być wykorzystany do analizy rodzaju, rozmiaru i położenia wady. Jest to wykres, w którym na osi poziomej przedstawia się czas, w jakim następuje pionowe odchylenie. Wielkości wady nie można ocenić przez bezpośrednie porównanie z sygnałem od wady o znanym rozmiarze i kształcie. Należy także uwzględnić różnice w głębokości zalegania wady.

Głębokość zalegania wady określa się na podstawie położenia echa wady na ekranie monitora. Jeżeli wykalibrujemy podstawę czasu, pozycja echa będzie umożliwiała do-

kładny odczyt położenia wady. Punkt zerowy na skali przedstawia powierzchnię wejścia fali ultradźwiękowej do próbki (impuls wejściowy).

Obraz monitora (jak na rys. 49) przedstawia typowy przykład ekranu w zobrazowaniu typu A przy badaniu głowicą normalną. Widzimy pierwszy duży sygnał odpowiadający impulsowi początkowemu na lewej stronie ekranu i nieco mniejszy sygnał po prawej stronie odzwierciedlający odbicie od dna. Pomiędzy tymi dwoma sygnałami widoczne jest echo od jakiejś granicy rozdziału w obrębie badanej próbki. Głębokość zalegania wady może być szybko oszacowana przez wizualne porównanie położenia echa wady na osi ekranu w stosunku do położenia impulsu początkowego i impulsu dna. Wykorzystanie zobrazowania typu A nie jest ograniczone tylko do wykrywania i charakterystyki defektu. Może być także użyte przy pomiarach grubości, prędkości dźwięku w materiale o znanej grubości, charakterystyki tłumienia i rozproszenia wiązki ultradźwiękowej. Może być wykorzystane zarówno w badaniu z jedną głowicą jak i z dwiema głowicami.

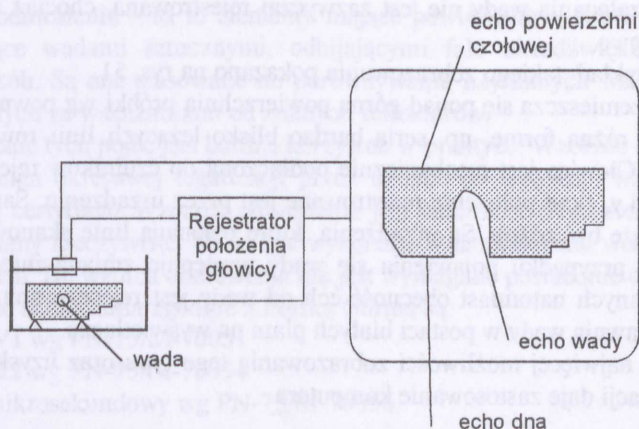


Rys. 49. Zobrazowanie typu A

3.4.2. Zobrazowanie typu B

Obraz typu B przedstawia zobrazowanie ilościowe czasu przejścia w funkcji długości próbki (długości linii skanowania próbki w czasie badania). Zobrazowanie to pokazuje względną głębokość reflektorów i jest stosowane głównie do określenia rozmiaru (długości w jednym kierunku), lokalizacji (obie pozycje i głębokość) i w pewnym stopniu do kształtu i orientacji długich wad.

Zobrazowanie typu B przedstawia wykres czasu w funkcji odległości. Na osi poziomej mamy czas, a oś pionowa reprezentuje położenie głowicy wzdłuż linii skanowania próbki w stosunku do położenia początkowego. Przykładowy obraz typu B pokazano na rys. 50.



Rys. 50. Zobrazowanie typu B

Natężenie echa nie jest bezpośrednio mierzone jak w przypadku obrazu typu A, lecz często jest wskazane półilościowo za pomocą jasności plamki na ekranie. Zobrazowanie typu B można sobie wyobrazić jako przekrój przez próbkę badaną. Wskazania od powierzchni odbijającej reflektorów w obrębie próbki przedstawione są z profilu. Pokazane jest także ich położenie, orientacja i głębokość wzdłuż wyimaginowanej płaszczyzny przekroju.

Jak widzimy na ekranie pokazanym na rys. 50 wada wewnętrzna widoczna z lewej strony próbki pokazana jest jako profil górnej powierzchni wady. Obszar próbki pod wadą pozostaje w cieniu. Rejestrowana jest długość wady w kierunku przemieszczania głowicy. Ponieważ wiązka dźwiękowa jest raczej stożkowa niż cylindryczna, wady występujące bliżej dna próbki badanej wydają się dłuższe niż te w pobliżu górnej powierzchni.

Podstawową zaletą tego typu zobrazowania jest możliwość ukazania rozkładu wad na przekroju elementu. Chociaż zobrazowanie typu B ma większe zastosowanie w medycynie niż w przemyśle, to jednak może być wykorzystywane do szybkiego wyświetlenia obrazu przekroju elementu w celu wybrania obszaru do dalszych badań, już ze zobrazowaniem typu A. Najlepsze wyniki w zobrazowaniu typu B uzyskuje się dla małych przetworników o wysokich częstotliwościach.

Powyższy opis dotyczy oczywiście defektoskopów analogowych. W przypadku urządzeń cyfrowych zobrazowanie typu B jak i stała rejestracja obrazu jest bardzo prosta i wymaga tylko komputera z określonym oprogramowaniem.

3.4.3. Zobrazowanie typu C

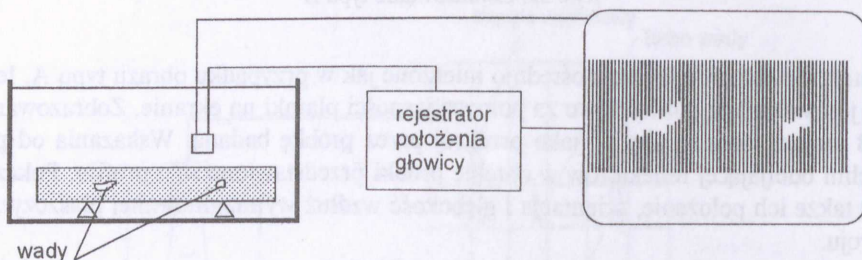
Jest to zobrazowanie półilościowe lub ilościowe amplitud sygnałów uzyskanych przy skanowaniu górnej powierzchni badanej próbki. Nagrywane są więc echa jako funkcja położenia każdej odbijającej powierzchni w objętości próbki.

Głębokość zalegania wady nie jest zazwyczaj rejestrowana, chociaż może być oceniona ilościowo.

Typowy przykład takiego zobrazowania pokazano na rys. 51.

Głowica przemieszcza się ponad górną powierzchnią próbki wg pewnego schematu. Może on mieć różną formę, np. seria bardzo blisko leżących linii równoległych czy kształt spirali. Głowica jest mechanicznie podłączona do czujników rejestracji położenia w osiach x i y , skąd położenie rejestrowane jest przez urządzenie. Sam system rejestracji echa może być różny. Są urządzenia, które pokazują linie skanowania jako zaciemnienie i w przypadku pojawienia się wady występuje zmiana intensywności zaciemnień. W innych natomiast obecność echa od wady jest rejestrowana jako brak zaciemnień, co ujawnia wady w postaci białych plam na wyświetlaczu.

Oczywiście najwięcej możliwości zobrazowania tego typu oraz uzyskiwania dodatkowych informacji daje zastosowanie komputera.



Rys. 51. Zobrazowanie typu C

Innym bardzo ważnym elementem układu do zobrazowania typu C jest bramka. Jest to dodatkowy obwód elektroniczny, który pozwoli na rejestrację echa tylko z wybranego obszaru czasowego, a więc na odrzucenie echa pochodzących od górnej i dolnej powierzchni. Monitorowany jest tylko obszar wewnątrz próbki. Szerokość bramki można zmieniać. Ustawiając bramkę na wąski zakres, możemy zbierać informacje tylko z pewnej warstwy obszaru badanego. Wielokrotne przeskanowanie tego obszaru przy różnych głębokościach ustawienia tej wąskiej bramki umożliwia uzyskanie dodatkowych informacji o głębokościach zalegania wykrytych wad.

3.5. Wzorce

Rozróżniamy dwa rodzaje wzorców:

a) Wzorce do skalowania, o powierzchniach lub krawędziach będących reflektorami odbijającymi fale ultradźwiękowe w znany, ściśle określony sposób. Z ich pomocą można oceniać i skalować aparaturę ultradźwiękową. Są one najczęściej określone normami.

b) Wzorce odniesienia – są to elementy mające powierzchnie, krawędzie lub inne reflektory będące wadami sztucznymi, odbijającymi fale ultradźwiękowe w znany i określony sposób. Są one stosowane do porównywania uzyskanych wskazań w próbkach rzeczywistych ze wskazaniami od znanych reflektorów.

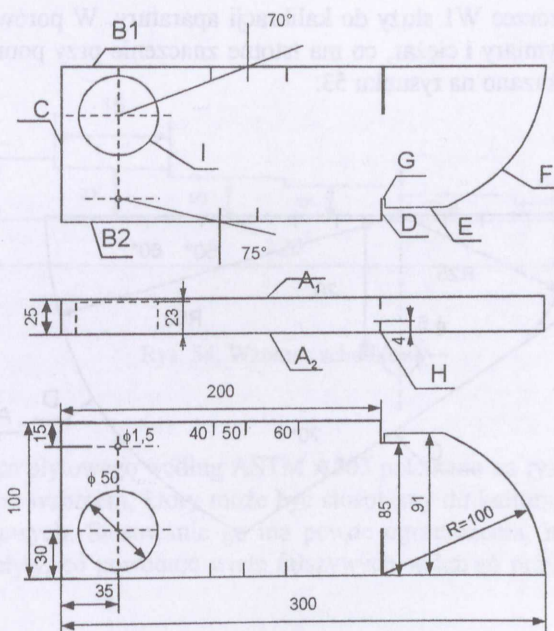
Rozgraniczenie tych pojęć jest bardzo korzystne w praktyce. Wzorzec do skalowania z definicji wymaga okresowej legalizacji przez uznane do tego celu instytucje, musi mieć więc swój certyfikat. Wzorzec odniesienia jest natomiast elementem, do którego porównujemy stany rzeczywiste. Może być wykonany w laboratorium według własnego uznania i projektu. Do wzorca odniesienia nie jest wymagane posiadanie certyfikatu.

Wzorcami do skalowania zgodnie z Polską Normą są:

- wzorzec W1 wg PN-75/M-70051
- wzorzec W2 wg PN-75/M-70054
- wzorzec mikrosekundowy wg PN-75/M-70056.

3.5.1. Wzorzec W1

Szkic tego wzorca przedstawiono na rys. 52.



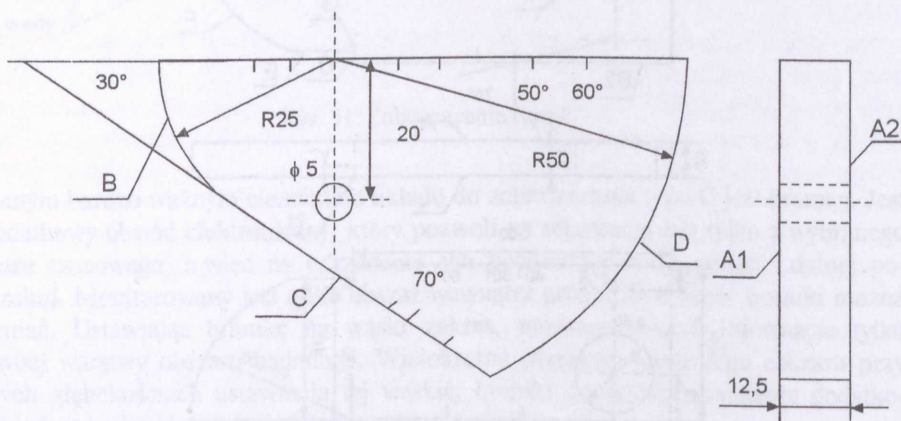
Rys. 52. Wzorzec W1

Wykonany jest ze stali niskowęglowej, dla której prędkość $c_L = 5940$ m/s. Przeznaczenie reflektorów tego wzorca jest następujące:

- płaskie powierzchnie A1 i A2 wykorzystuje się do skalowania zakresu obserwacji i wyznaczania parametrów badania głowicami normalnymi,
- płaskie powierzchnie B1 i B2 oraz C i D służą do skalowania zakresu obserwacji dla głowic normalnych,
- płaskie powierzchnie E i B1 (odległe o 91 mm), dają po wyskalowaniu zakresu obserwacji od 0 do 91 mm dla fal podłużnych (głowice normalne) zakres obserwacji od 0 do 50 mm dla fal poprzecznych (głowice skośne),
- dno nacięcia G, które z powierzchniami B2 i E tworzy trzy leżące blisko siebie reflektory służące do określania rozdzielczości układu „defektoskop – głowica normalna”,
- powierzchnia walcowa F oraz boczne ściany dwóch rowków H w powierzchni A1 i A2 przechodzące przez środek krzywizny powierzchni F służą do skalowania zakresu obserwacji dla głowic skośnych i nastawiania czułości defektoskopu pracującego z głowicami skośnymi,
- powierzchnia walcowa i otworu okrągłego używana jest między innymi do pomiaru kąta załamania głowic skośnych.

3.5.2. Wzorzec W2

Podobnie jak wzorzec W1 służy do kalibracji aparatury. W porównaniu do wzorca W1 ma mniejsze wymiary i ciężar, co ma istotne znaczenie przy pomiarach w terenie. Schemat wzorca pokazano na rysunku 53.



Rys. 53. Wzorzec W2

Przeznaczenie poszczególnych reflektorów jest następujące:

- płaskie powierzchnie A1 i A2 służą do skalowania zakresu obserwacji dla głowic normalnych,

– powierzchnie walcowe B i C służą do skalowania zakresu obserwacji głowic skośnych,

– powierzchnia walcowa otworu D służy do kontroli kąta załamania głowic skośnych oraz do nastawiania i kontroli czułości badania układów „defektoskop – głowica normalna” i „defektoskop – głowica skośna”.

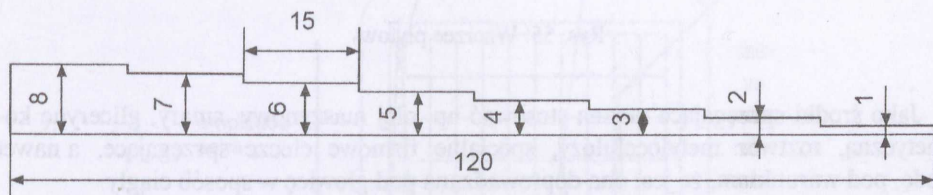
3.5.3. Wzorzec mikrosekundowy

Wzorce mikrosekundowe są to walce stalowe o tak dobranej wysokości, że czas przejścia fal ultradźwiękowych od powierzchni do dna i z powrotem jest wielokrotnością jednej mikrosekundy [3,4,5,10,20 μ s]. Służą do skalowania podstawy czasu w jednostkach czasu.

3.5.4. Inne wzorce

Wzorzec schodkowy

Wzorzec ten nie jest objęty polską normą. Wykonany jest ze stali niskowęglowej – rys. 54 w postaci ośmiu schodków o grubości od 1 do 8 mm. Służy do skalowania głowic podwójnych



Rys. 54. Wzorzec schodkowy

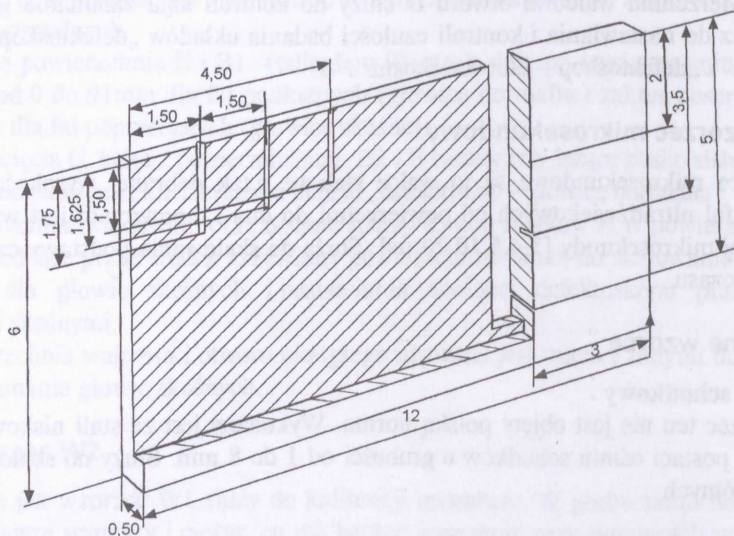
Wzorzec płytowy

Schemat wzorca płytowego według ASTM A503 pokazano na rys. 55.

Jest innego typu wzorcem, który może być stosowany do kalibracji zarówno głowic prostych jak i kątowych. Stosowanie go ma pewne ograniczenia, min. z powodu niewielkiej grubości płyty, co powoduje wiele fałszywych wskazań przy kalibracji głowicą normalną.

3.6. Środki sprzęgające

Środki sprzęgające powinny umożliwiać równomierne przejście fal ultradźwiękowych pomiędzy głowicą a powierzchnią badaną możliwie bez strat, tym samym umożliwiając powtarzalną ocenę wskazań. Nie powinny także reagować z badanym materiałem.



Rys. 55. Wzorzec płytowy

Jako środki sprzęgające można stosować np. olej maszynowy, smary, glicerynę kosmetyczną, roztwór metylocelulozy, specjalne firmowe ciecze sprzęgające, a nawet wodę, pod warunkiem, że jest ona doprowadzana pod głowicę w sposób ciągły.

Lepkość środków sprzęgających należy dopasować do warunków badania. Przy chropowatych lub nachylonych w stosunku do poziomu powierzchniach powinno się stosować środki o dużej lepkości. Należy przy tym zwrócić uwagę na pojawianie się wskazań na ekranie od środka sprzęgającego, który może się gromadzić przed głowicą lub na powierzchniach badanych. W razie potrzeby, środkom sprzęgającym stawia się dalsze wymagania, aby zapobiec ich szkodliwemu działaniu na badane elementy, np. na elementach, które mają być malowane po badaniu należy stosować wodne roztwory metylocelulozy (klej do tapet).

W temperaturach ujemnych roztwór należy przygotować na bazie rozpuszczalnika odpornego na zamarzanie, np. denaturat, płyny do spryskiwaczy samochodowych itp.

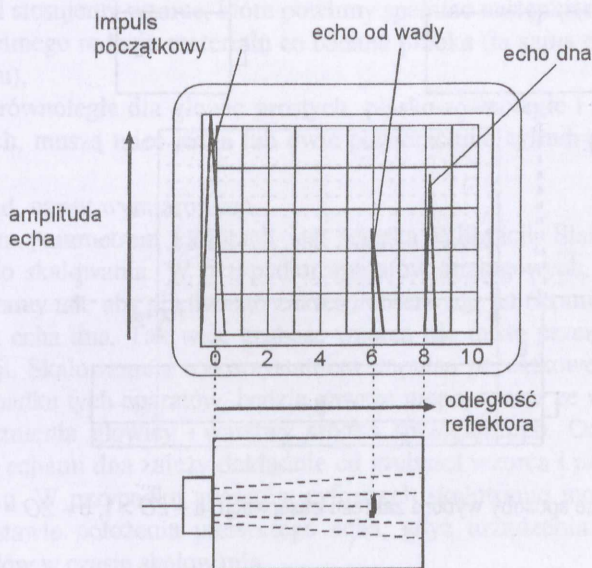
W czasie przeprowadzania badań porównawczych ważne jest, aby stosować ten sam środek sprzęgający i w tej samej temperaturze. Nie można więc przeprowadzać kalibracji w warunkach laboratoryjnych, jeżeli następnie będziemy badać cieplejsze lub zimniejsze materiały.

ROZDZIAŁ IV

SKALOWANIE

Standardowe instrumenty analogowe lub cyfrowe wyświetlają czas przejścia echa na osi poziomej ekranu, a wysokość sygnału, czyli amplitudę echa, na osi pionowej (obraz typu A). W instrumentach analogowych oś pozioma jest podzielona na 10 działek, które są dalej podzielone na 5 lub 10 zakresów, zależnie od wielkości ekranu. Aparaty cyfrowe nie potrzebują takiej skali, ponieważ wyniki pomiarów są wyświetlane w linii pomiarowej, poniżej obrazu A.

Takie dopasowanie, w którym rzeczywista droga przebyta przez falę dźwiękową w materiale odpowiada określonym działkom skali ekranu (oś X – podstawa czasu) nazywa się skalowaniem zakresu obserwacji (rys. 56).

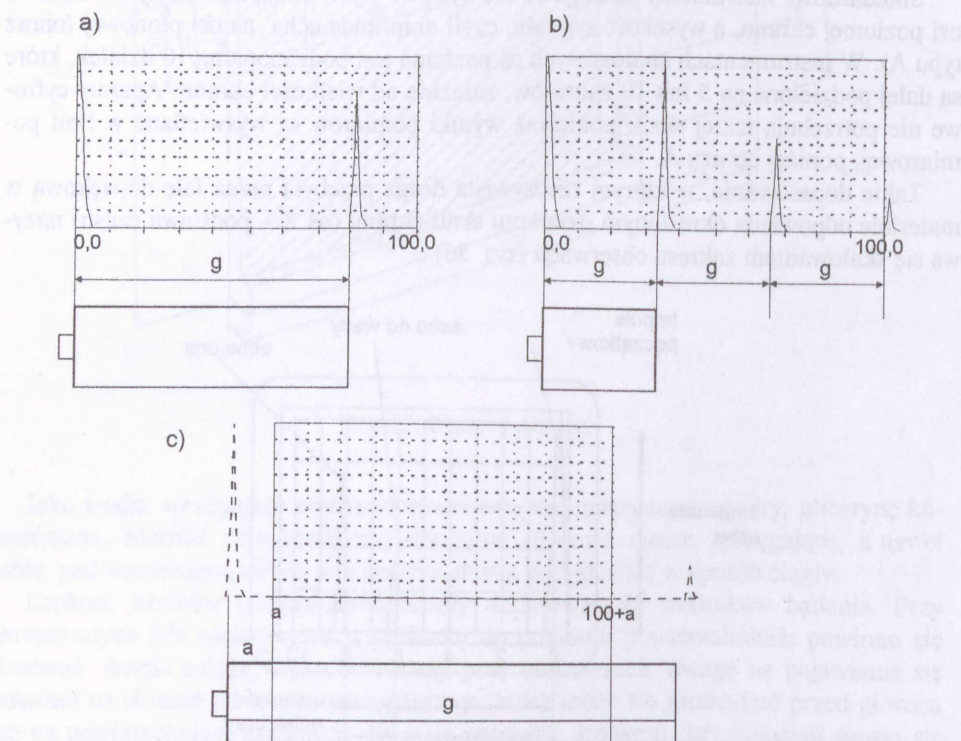


Rys. 56. Zasada skalowania

Przed przystąpieniem do skalowania należy ustalić wielkość zakresu obserwacji (ZO). Jest to zakres długości, który będzie uwidoczniiony na ekranie. Zakres obserwacji powinien przekraczać długość badanego elementu (rys. 57a). Zalecany jest zakres obserwacji o długości równej $3g$, gdzie g jest grubością (długością) badanego elementu. Przy tak dobranym zakresie obserwacji w czasie badania na ekranie monitora mamy

widoczne trzy echa dna (rys. 57b). Obserwację prowadzimy w środku obrazu ekranu, tzn. pomiędzy 1. i 2. echem dna.

W szczególnych przypadkach ZO może być mniejszy od długości badanego elementu. Taki zakres obserwacji można stosować, gdy interesuje nas tylko wybrany obszar badanego detalu. Oczywiście badanie takie jest możliwe, o ile w pomijanym obszarze materiału (o grubości a – rys. 57 c) nie występują wady wpływające na odczyt w rozpatrywanym zakresie badania.



Rys. 57. Różne sposoby wyboru zakresu obserwacji: a – $ZO > l$; b – $ZO = 3l$; c – $ZO < l$

W aparatach analogowych wszelkie ustawienia ech wykonujemy za pomocą podziałki na skalach umieszczonych na ekranie oscyloskopu. W przypadku aparatów cyfrowych położenie echa ustawiane jest na podstawie położenia obliczanego przez mikroprocesor i wyświetlanego na ekranie monitora. Warunkiem uzyskania takich informacji dla wybranego echa jest umieszczenie bramki na wybranym pikie. Echo to może być zlokalizowane względem wartości maksymalnej amplitudy (wierzchołka piku) lub zbocza piku w zależności od zadanych parametrów odczytu. Defektoskop podaje informacje dotyczące zarówno położenia piku w mm jak i jego wysokości wyrażonej w procentach wysokości ekranu.

W urządzeniach cyfrowych wielkość zakresu obserwacji wprowadzana jest do pamięci aparatu i wykorzystywana przy obliczeniach położenia ech wykonywanych przez mikroprocesor.

W aparatach analogowych wybrany zakres obserwacji w mm dzieli się przez 10-stopniową podziałkę skali, aby obliczyć tzw. podziałkę podstawy czasu (ppc):

$$ppc = \frac{ZO}{10} \cdot \frac{mm}{podz.skali}$$

Dla danego zakresu pomiarowego położenie skalowanych ech oblicza się wg wzoru:

$$d(n) = \frac{S_n}{ppc},$$

gdzie:

- n – echa nr 1, 2, 3...,
- $d(n)$ – położenie echa nr 1, 2, 3...,
- S_n – droga dźwięku echa nr 1, 2, 3... [mm],
- ppc – podziałka podstawy czasu [mm/podziałkę skali].

Do skalowania stosujemy wzorce, które powinny spełniać następujące wymagania:

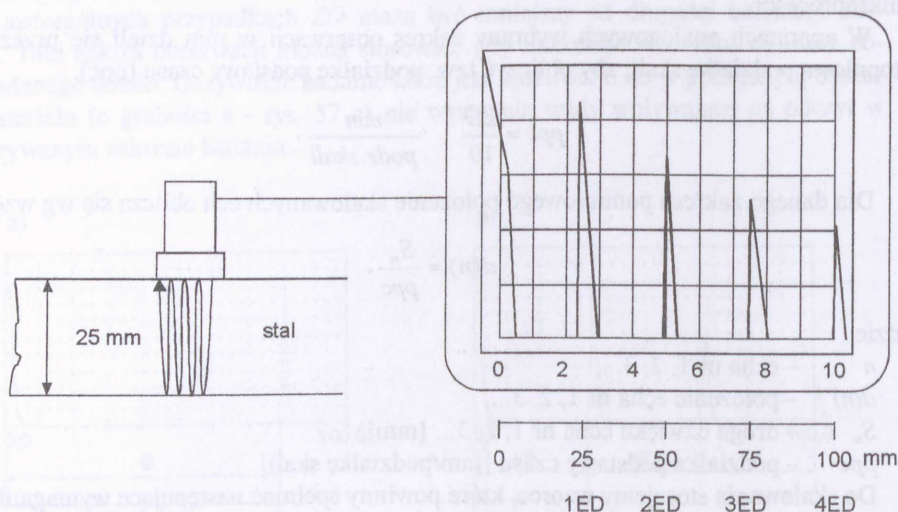
1. być z tego samego rodzaju materiału co badana próbka (ta sama prędkość rozchodzenia się dźwięku),
2. być płasko-równoległe dla głowic prostych, płasko-równoległe i stopniowane dla głowic podwójnych, muszą mieć jedną lub dwie powierzchnie cylindryczne dla głowic skośnych,
3. nie mieć wad, nawet wymiarowych.

Innym ważnym parametrem kalibracji jest ścieżka kalibracji. Stanowi ją wymiar wzorca użytego do skalowania. W przypadku aparatów analogowych, wymiar ścieżki skalowania dobieramy tak, aby dla danego zakresu obserwacji na ekranie widoczne były przynajmniej dwa echa dna. Tak więc grubość wzorca nie może przekraczać wartości zakresu obserwacji. Skalowanie z wykorzystaniem impulsu początkowego i pierwszego echa dna, w przypadku tych aparatów, będzie zawsze niepoprawne ze względu na błąd wynikający z opóźnienia głowicy i warstwy środka sprzęgającego. Odległość między dwoma kolejnymi echem dna zależy dokładnie od grubości wzorca i prędkości rozchodzenia się dźwięku. W przypadku aparatów cyfrowych skalowanie może być przeprowadzone na podstawie położenia pierwszego echa, gdyż urządzenia te umożliwiają korekcję tych błędów w czasie skalowania.

4.1. Skalowanie z głowicą normalną

Skalowanie przeprowadza się wykorzystując sekwencję ech od dna wzorca W1 lub płasko-równoległej próbki badanego materiału o znanych wymiarach. Droga dźwięku ech dna $S(n)$ = $n \cdot g$, gdzie $S(n)$ – droga dźwięku echa n , n – numer echa, g – grubość wzorca (rys. 58). Zarówno zakres obserwacji jak i grubość wzorca muszą być znane

przed kalibracją. W czasie skalowania doprowadzamy echa do położenia na ekranie monitora odpowiadającego ich rzeczywistej odległości od głowicy.



Rys. 58. Zasada skalowania głowicą normalną

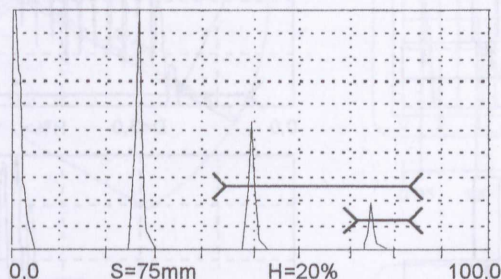
Jeżeli nie znamy prędkości rozchodzenia się dźwięku w materiale, musimy wyznaczyć ją przed skalowaniem. W tym celu wykorzystujemy dwa kolejne echa dna od próbki o znanej grubości. Ustawienie pików w odległościach odpowiadających krotności grubości próbki wzorcowej przeprowadzamy za pomocą zmiany prędkości rozchodzenia się dźwięku.

W przypadku aparatów cyfrowych wykorzystujemy w tym celu opcję pomiarową z dwiema bramkami, które naprowadzamy na dwa porównywane echa (rys. 59). Urządzenie podaje nam automatycznie odległość między wybranymi echami. Także przez zmianę prędkości dźwięku doprowadzamy do tego, aby odległość pomiędzy echami odpowiadała grubości wzorca.

Niektóre defektoskopy cyfrowe (np. USD 10 firmy Krautkrämer) mają możliwość automatycznego skalowania na podstawie dwóch wskazanych ech i podania rzeczywistej odległości między nimi.

W przypadku badania materiału z innego materiału niż posiadany wzorec, ale o znanej prędkości rozchodzenia się dźwięku, skalowanie przeprowadzamy w następujący sposób. Skalujemy przyrząd na posiadanym wzorcu o prędkości fali dźwiękowej c_w . Obliczamy położenie kolejnych ech dna – $d(n)'$ – dla prędkości fali dźwiękowej w badanym materiale c_m :

$$d(n)' = d(n) \frac{c_m}{c_w}$$



Rys. 59. Położenie bramek na monitorze przy wyznaczaniu prędkości dźwięku w materiale za pomocą aparatu cyfrowego

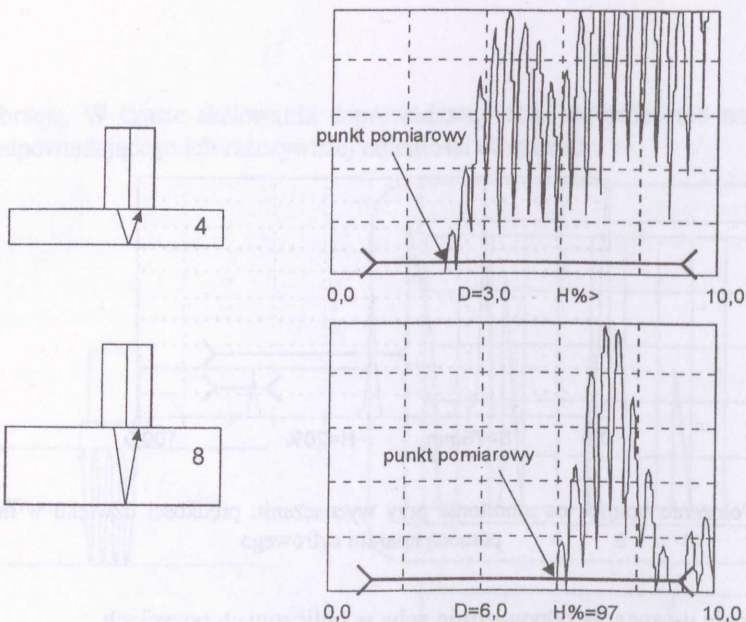
Następnie ustawiamy odpowiednie echa w obliczonych pozycjach.

W urządzeniach cyfrowych po wyskalowaniu na wzorcu wprowadzamy do pamięci aparatu nową wartość prędkości rozchodzenia się fali c_m . Takie skalowanie oczywiście obciążone jest znacznie większym błędem niż w przypadku wykorzystania wzorców z materiału takiego samego jak badany.

4.2. Skalowanie z głowicą podwójną

Konstrukcja głowic podwójnych tj. odległość pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem sprawia, że droga dźwięku ma kształt litery V, tym samym powstaje tzw. błąd obejścia, który musi być kompensowany przez ustawienie nieco wyższej prędkości dźwięku, aby czas przejścia odpowiadał dokładnie czasowi przejścia dźwięku w danym materiale na tej grubości. Co więcej, na skutek tego, że wiązka dźwięku przechodzi pochyłona, podczas transmisji i odbicia pulsów dźwiękowych do wzorca i z powrotem do nadajnika, generują się fale poprzeczne. Tak więc kalibracja z użyciem kolejnych ech dna nie jest możliwa w przypadku badania głowicami podwójnymi. Zamiast tego stosujemy wzorzec schodkowy z dwoma różnymi stopniami, kompensując w ten sposób błąd obejścia obu grubości ścianek. Ze względu na schodkowy kształt impulsu echa na ekranie zaleca się stosowanie dodatniopółkowego prostowania fali.

Aby prawidłowo przeprowadzić kalibrację, musimy mieć wzorzec o dwóch różnych wymiarach (dwa wzorce) odpowiadających minimalnej i maksymalnej wartości zakresu pomiarowego. Na rys. 60 pokazano zasadę skalowania dla zakresu 3-6 mm. Skalowanie przeprowadzamy kolejno dla obu wymiarów, kompensując różnicę w długości drogi dźwięku w stosunku do rzeczywistej grubości materiału (błąd obejścia), prędkością rozchodzenia się dźwięku. W aparatach cyfrowych, bramkę umożliwiającą nam identyfikację echa ustawiamy w opcji zbocze piku, co jest ważne ze względu na zastosowanie półkowego prostowania fali.



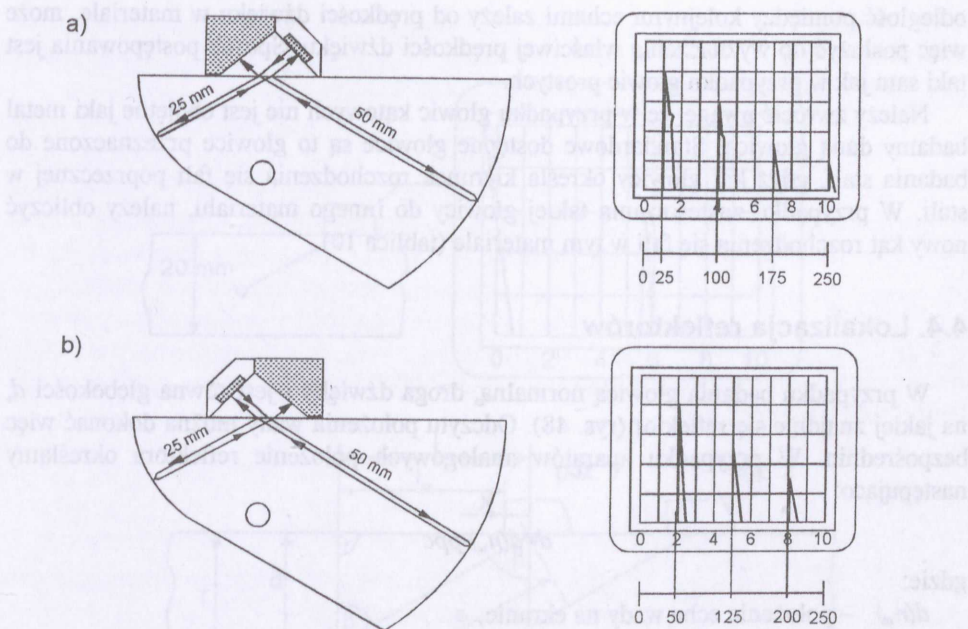
Rys. 60. Zasada skalowania z głowicą podwójną

4.3. Skalowanie z głowicą kątową

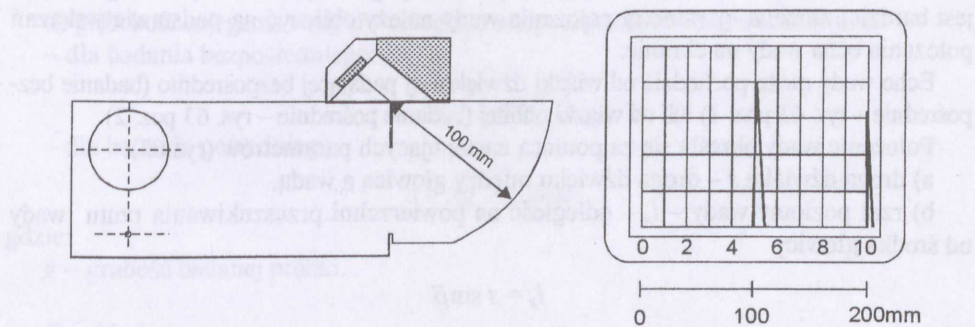
W przypadku skalowania z głowicą kątową potrzebujemy specjalnych wzorców z reflektorem, na który fala pada prostopadłe. Ten warunek spełnia np. cylindryczna powierzchnia, ponieważ promień koła jest zawsze prostopadły do łuku koła. Wiązka dźwięku musi więc wychodzić dokładnie ze środka koła.

Do badań stali niskostopowych wykorzystuje się przy skalowaniu dwa standardowe wzorce W1 i W2. Wzorzec W2 składa się z dwóch połączonych ćwiartek koła (kwadrantów) o średnicach $R_{25} = 25$ mm i $R_{50} = 50$ mm. Różnica drogi dźwięku pomiędzy dwoma kolejnymi echem jest zawsze równa $R_{25} + R_{50} = 75$ mm. Gdy głowica jest ustawiona w kierunku R_{25} otrzymujemy echa na drodze: 25, 100, 175, 250 ... – rys. 61a. Natomiast przy ustawieniu głowicy w kierunku R_{50} otrzymujemy echa w odległościach 50, 125, 200...(rys. 61b).

Wzorzec W1 ma wycinek koła o średnicy R_{100} . Nacięcie o długości 20 mm i głębokości 6 mm wyznacza środek wycinka. Tak więc przy ustawieniu głowicy w kierunku promienia 100 mm punkt środkowy głowicy kątowej znajduje się dokładnie nad tym nacięciem. Dla takiego ustawienia otrzymamy następującą sekwencję ech: 100, 200, 300 ...(rys. 62).



Rys. 61. Zasada skalowania z głowicą skośną na wzorcu W2: a – w kierunku promienia 25 mm, b – w kierunku promienia 50 mm



Rys. 62. Skalowanie z głowicą kątową na wzorcu W1

Jeżeli chcemy badać inne materiały niż stale niskostopowe, trzeba użyć odpowiadającego im wzorca półkolistego lub wzorców W1 lub W2 wykonanych z tego samego materiału. W takich przypadkach prędkość rozchodzenia się dźwięku we wzorcu nie jest znana i trzeba ją zmierzyć przy kalibracji. Tak jak w przypadku głowic prostych

odległość pomiędzy kolejnymi echem zależy od prędkości dźwięku w materiale, może więc posłużyć do wyznaczenia właściwej prędkości dźwięku. Sposób postępowania jest taki sam jak w przypadku głowic prostych.

Należy zwrócić uwagę, że w przypadku głowic kątowych nie jest obojętne jaki metal badamy daną głowicą. Standardowe dostępne głowice są to głowice przeznaczone do badania stali, gdyż kąt głowicy określa kierunek rozchodzenia się fali poprzecznej w stali. W przypadku zastosowania takiej głowicy do innego materiału, należy obliczyć nowy kąt rozchodzenia się fali w tym materiale (tablica 10).

4.4. Lokalizacja reflektorów

W przypadku badania głowicą normalną, droga dźwięku s jest równa głębokości d , na jakiej znajduje się reflektor (rys. 48). Odczytu położenia wady można dokonać więc bezpośrednio. W przypadku aparatów analogowych położenie reflektora określamy następująco:

$$d = d(n_w) \cdot ppc$$

gdzie:

$d(n_w)$ – położenie echa wady na ekranie,

ppc – podziałka podstawy czasu,

d – położenie badanego reflektora.

W aparatach cyfrowych odległość ta jest automatycznie obliczana przez aparat i podawana po naprowadzeniu bramki na echo od wady.

Przy lokalizacji wad za pomocą głowicy kątowej, gdzie geometria przebiegu wiązki jest bardziej złożona, parametry położenia wady należy obliczyć na podstawie wskazań położenia echa wady na ekranie.

Echo wady może pochodzić od wiązki dźwiękowej padającej bezpośrednio (badanie bezpośrednie – rys. 63 poz. 1) lub od wiązki odbitej (badanie pośrednie – rys. 63 poz. 2).

Położenie wady określa się za pomocą następujących parametrów (rys. 63):

a) droga dźwięku s – droga dźwięku między głowicą a wadą,

b) rzut poziomy wady – l_x – odległość na powierzchni przeszukiwania rzutu wady od środka głowicy

$$l_x = s \sin \beta$$

gdzie:

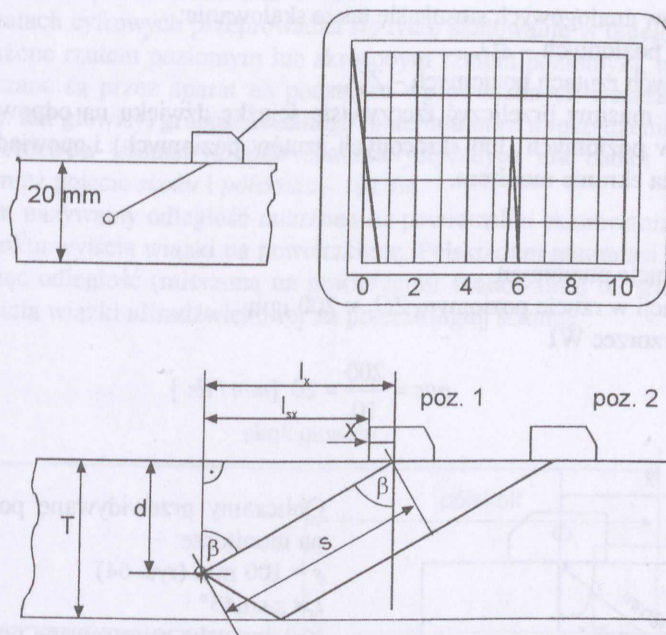
β – kąt głowicy,

c) skrócony rzut poziomy wady – l_{sx} – odległość mierzona na powierzchni przeszukiwania między rzutem wady a czołem głowicy

$$l_{sx} = l_x - x$$

gdzie:

x – wyprzedzenie głowicy (odległość od czoła głowicy do jej środka),



Rys. 63. Geometria położenia wady przy lokalizacji głowicą kątową

- d) głębokość zalegania wady d – odległość wady od powierzchni przeszukiwania:
– dla badania bezpośredniego:

$$d = s \cos \beta$$

- dla badania pośredniego

$$d = 2g - s \cos \beta$$

gdzie:

g – grubość badanej próbki.

Przykład:

Badanie głowicą kątową MWB70-4 ($\beta = 70^\circ$, $x = 13$ mm, $f = 4$ MHz. Zakres obserwacji 0-200 mm. Grubość ścianki badanej próbki $g = 28$ mm. Echo wady na drodze dźwięku $s = 121$ mm.

Obliczamy współrzędne położenia wady:

- skrócony rzut poziomy $l_{sx} = 121 \text{ mm} \cdot \sin 70^\circ - 13 \text{ mm} = 100,6 \approx 101$ mm
- głębokość wady $d = 121 \text{ mm} \cdot \cos 70^\circ = 41,4$ mm
- rzeczywista głębokość $d' = 2g - d = 56 \text{ mm} - 41,4 \text{ mm} = 14,6 \text{ mm}$.

Ze względu na przydatność określenia położenia wady za pomocą jej rzutu poziomego lub rzutu skróconego, a nie bezpośredniej odległości od głowicy (ścieżki dźwięku), dla aparatów analogowych stosuje się także skalowanie:

- w rzutach poziomych – ZO_x
- w skróconych rzutach poziomych – ZO_{sx}

W tym celu musimy przeliczyć rzeczywistą ścieżkę dźwięku na odpowiadające jej wartości rzutów poziomych (lub skróconych rzutów poziomych) i opowiadające temu położenia ech na ekranie monitora.

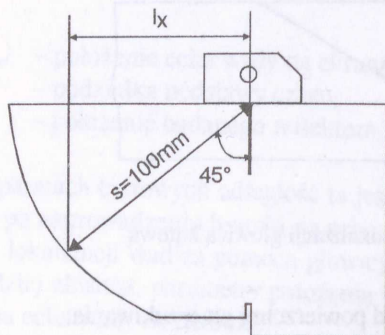
Przykład:

Skalujemy w rzucie poziomym.

Zakres obserwacji w rzucie poziomym $ZO_x = 200$ mm.

Głowica 45° , wzorzec W1

$$ppc = \frac{200}{10} = 20 \text{ [mm / dz.]}$$



Obliczamy przewidywane położenie ech na monitorze:

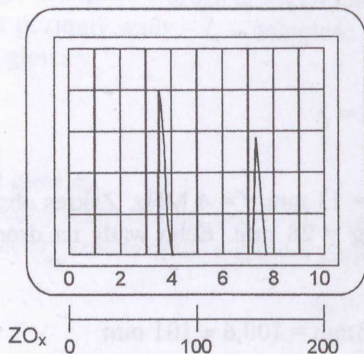
$$s = 100 \text{ mm (rys. 64)}$$

$$l_x = s \cdot \sin 45^\circ$$

Kolejne echa rejestrowane przez defektoskop, będą stanowiły ze względu na ścieżkę dźwięku (R_{100}) ciąg 100, 200, 300...

Odpowiadające im wartości rzutów skróconych:

Rys. 64. Zasada obliczania rzutu skróconego



Rys. 65. Skalowanie w rzucie skróconym

$100 \cdot \sin 45^\circ$, $200 \cdot \sin 45^\circ$, $300 \cdot \sin 45^\circ$... tj. 70,7; 141,4; 212,1..., co dla danej $ppc=20$ odpowiada położeniom na ekranie : 3,5; 7,1; 10,6....

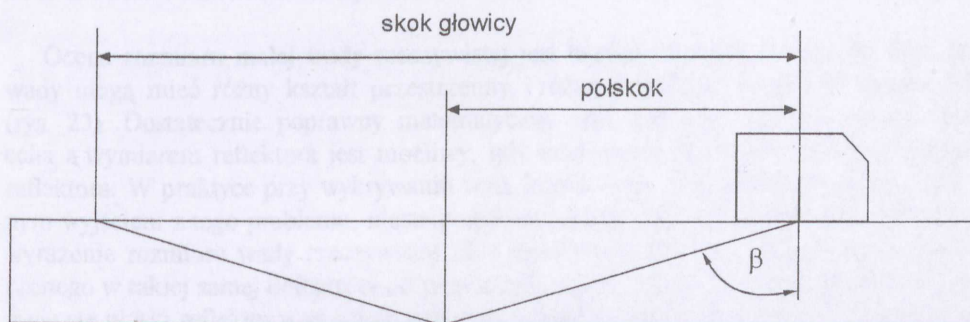
Przeprowadzamy skalowanie doprowadzając do ustawienia kolejnych ech na ekranie na obliczonych pozycjach (rys. 65).

Tego typu skalowanie przeprowadza się na przykład przy korzystaniu z dostępnych na rynku nakładanych na ekran skal OWR.

W aparatach cyfrowych przeprowadza się tylko skalowanie w odległości. Położenie wady wyrażone rzutem poziomym lub skróconym rzutem poziomym, a także jej głębokość, obliczane są przez aparat na podstawie wprowadzonych wcześniej takich parametrów jak: kąt głowicy, grubość badanego materiału oraz wyprzedzenie głowicy (x).

Do parametrów geometrycznych charakterystycznych dla badań głowicą kątową należy również pojęcie *skoku* i *półskoku* – rys. 66.

Skokiem nazywamy odległość mierzoną na powierzchni skanowania od środka głowicy do punktu wyjścia wiązki na powierzchnię. Półskokiem natomiast połowę tej odległości, a więc odległość (mierzoną na powierzchni skanowania) od środka głowicy do punktu odbicia wiązki ultradźwiękowej na przeciwległej ścianie.



Rys. 66. Wyjaśnienie pojęcia skoku i półskoku

Pojęcie skoku i półskoku wykorzystywane jest przy badaniach ultradźwiękowych spoin. Zakres skanowania w obszarze między półskokiem a skokiem w stosunku do osi spoiny pozwala na objęcie badaniem całej jej objętości.

Czułość badania

Przeprowadzając badania ultradźwiękowe należy pamiętać o ustalaniu czułości przeprowadzonego badania. Czułość badania określa nam wzmocnienie, jakie należy stosować w czasie badania, np.

$$CB = W(h_{g=25}=0,4H)+30 \text{ dB}$$

oznacza, że poziom wzmocnienia stosowany w czasie badania przekracza o 30 dB poziom echa o wysokości 0,4 H uzyskanego od grubości 25 mm. Wysokość 0,4 H nazywamy *poziomem odniesienia*.

ROZDZIAŁ V

OCENA WIELKOŚCI WADY

Stosując metodę echa możemy określić wielkość wady. W zależności od wielkości, wady możemy podzielić na:

- małe, o rozmiarach mniejszych od średnicy wiązki ultradźwiękowej,
- duże, o rozmiarach przekraczających średnicę wiązki.

W zależności od tego stosujemy różne techniki oceny wielkości wady.

5.1. Ocena rozmiaru małych wad

Ocena rozmiaru małej wady rzeczywistej jest bardzo złożona z uwagi na fakt, że wady mogą mieć różny kształt przestrzenny i różną orientację względem wiązki fal (rys. 23). Dostatecznie poprawny matematyczny opis zależności między wysokością echa a wymiarem reflektora jest możliwy, gdy możemy opisać matematycznie kształt reflektora. W praktyce przy wykrywaniu wad, kształt wady jest jednak nieznany. Pewnym wyjściem z tego problemu, niestety uproszczonym, jest ocena porównawcza przez wyrażenie rozmiaru wady rzeczywistej jako rozmiaru reflektora wzorcowego umieszczonego w takiej samej odległości od głowicy jak wada. Jako reflektor wzorcowy przyjmuje się płaski reflektor o kształcie kołowym i gładkiej powierzchni, umieszczony prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali i znajdujący się w osi wiązki.

W praktyce stosuje się do bezpośredniego skanowania szereg reflektorów odniesienia różnych od wyidealizowanego reflektora wzorcowego.

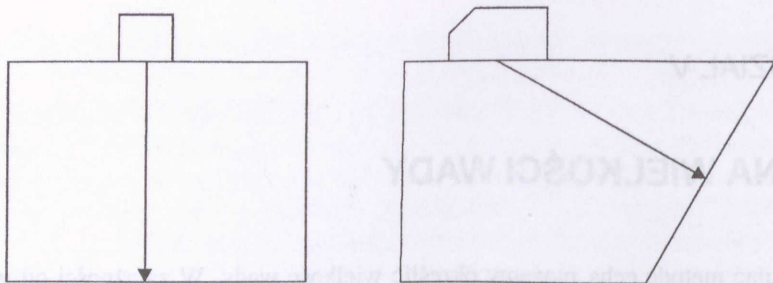
5.1.1. Reflektory odniesienia

Dno

Dno (D) zgodnie z definicją jest to płaski reflektor ustawiony prostopadle do osi wiązki dźwięku i przekraczający jej granice.

W praktyce badawczej jest to najczęściej wykorzystywany reflektor odniesienia, zalecany szczególnie do użycia dla głowic prostych na płasko równoległych próbkach – rys. 67a. Zazwyczaj echo dna nie jest wykorzystywane dla głowic kątowych, poza specjalnymi wzorcami odniesienia (rys. 67b), gdzie kąt naroża wzorca jest równy kątowi głowicy.

Echo dna pozostaje prawie niezmienione w zakresie pola bliskiego głowicy i wykazuje spadek 6 dB przy dwukrotnym zwiększeniu odległości od głowicy w polu dalekim.

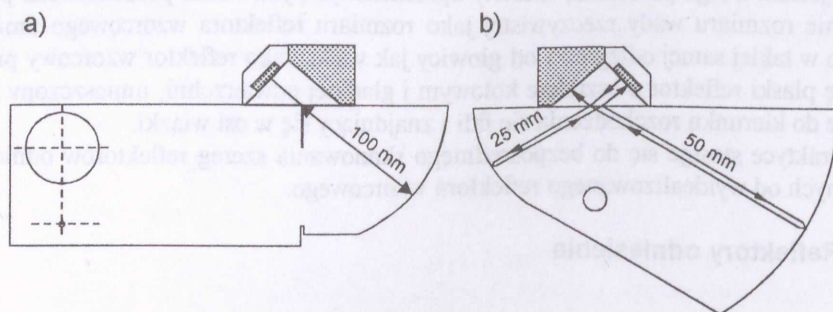


Rys. 67. Dno jako reflektor odniesienia a – dla głowicy normalnej, b – dla głowicy kątowej

Kwadrant

Kwadrant jest wycinkiem walca stosowanym we wzorcach do skanowania za pomocą głowic kątowych – rys. 68.

Charakterystyka odbiciowa kwadrantu na skutek krzywizny powierzchni walcowej różni się od rzeczywistego echa dna tej samej ścieżki dźwięku. Często na skutek tzw. efektu skupiającego obserwuje się pewne wzmocnienie echa. Lecz jest to także funkcją szerokości wzorca i pola dźwięku głowicy (to ostatnie zależy od kąta głowicy i jej częstotliwości).



Rys. 68. Wykorzystanie kwadrantu jako reflektora odniesienia: a – na wzorcu W1, b – na wzorcu W2

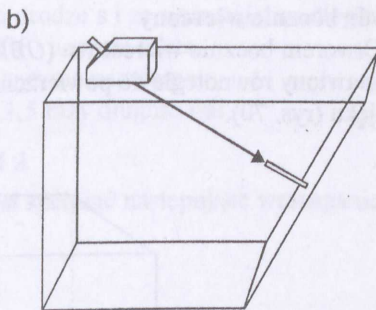
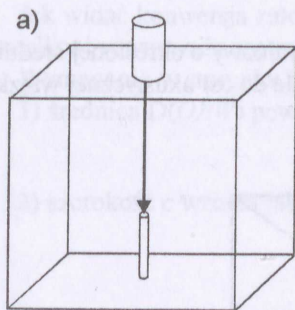
Producenci głowic mierzą różnicę wzmocnienia pomiędzy kwadrantami na wzorcach W1 i W2 a odpowiadającym im dnem rzeczywistym. Wartość ta jest podawana jako korekta echa kwadrantu $\Delta V_{K1/2}$ dla danej głowicy.

Otwór płaskodenny

Wzorec taki jest stosowany :

– jako reflektor odniesienia w metodzie wzorca, szczególnie w przypadku badania odlewów i odkuwek,

- jako wada zastępcza do oceny odbijalności wad rzeczywistych przy stosowaniu metody OWR,
- dla ustawienia odtwarzalnego wzmocnienia w defektoskopach i do jego kontroli.



Rys. 69. Otwór płaskodenny jako reflektor odniesienia przy badaniach głowicą: a – normalną, b – skośną

Odtwarzalność w granicach 2 dB można uzyskać z otworem płaskodennym (OP), jeżeli fala pada prostopadle. Z tego powodu otwór płaskodenny stosowany jest jako reflektor odniesienia głównie przy badaniach głowicami kątowymi, szczególnie przy zastosowaniu techniki tandem. W polu dalekim ($s > 3N$) wysokość echa danego reflektora płaskiego, kolistego w funkcji odległości wynosi

$$\frac{H(s_2)}{H(s_1)} = \left[\frac{s_1}{s_2} \right]^2$$

odpowiada to zmianie w dB

$$\Delta H = 20 \cdot \log \left[\frac{H(s_2)}{H(s_1)} \right] = 40 \cdot \log \left[\frac{s_2}{s_1} \right]$$

gdzie:

s_1 i s_2 – odległości od przetwornika.

Oznacza to, że przy dwukrotnym zwiększeniu odległości wysokość echa spada o 12 dB. Zmianę średnicy można opisać następującą zależnością

$$\frac{H(D_2)}{H(D_1)} = \left[\frac{D_2}{D_1} \right]^2$$

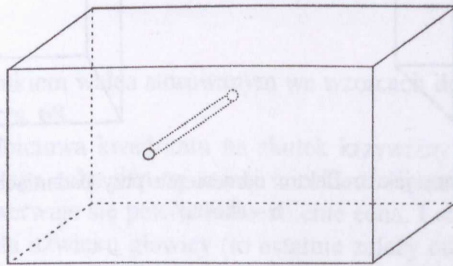
co odpowiada zmianie wzmocnienia w decybelach:

$$\Delta H = 20 \cdot \log \left[\frac{H(D_2)}{H(D_1)} \right] = 40 \cdot \log \left[\frac{D_2}{D_1} \right]$$

Oznacza to, że przy dwukrotnym zwiększeniu średnicy, wysokość echa reflektora wzrasta o 12 dB.

Otwór bocznie wiercony

Otworem bocznie wierconym (OBW) nazywamy otwór walcowy o określonej średnicy ustawiony równolegle do powierzchni wzorca i prostopadle do osi akustycznej wiązki dźwięku (rys. 70).



Rys. 70. Otwór bocznie wiercony jako reflektor odniesienia przy badaniu głowicą kątową

Jeżeli chodzi o wielkość, to otwór bocznie wiercony jest reflektorem mieszanym. W jednym kierunku mieści się on całkowicie w objętości wiązki, podczas gdy w drugim przekracza jej granice. Fakt ten jak i charakterystyka odbiciowa bocznie wierconego otworu powoduje, że jego zachowanie w polu dźwięku w funkcji odległości nie odpowiada ani krzywej dla echa dna ani dla małego reflektora.

a) w polu dalekim, tj. dla drogi dźwięku $s > 3N$, amplituda echa spada o 9 dB przy podwojeniu odległości i wzrasta o 3 dB przy podwojeniu średnicy otworu.

Ponadto w polu dalekim stosunek wysokości echa otworu bocznie wierconego $H(OBW)$ i echa dna $H(D)$ na tej samej drodze s można obliczyć z następującego wzoru:

$$H(OBW) = H(D) \cdot \sqrt{\frac{d}{2s}}$$

gdzie:

d – średnica otworu,

s – odległość do reflektora.

Różnicę wzmocnienia $\Delta V(OBW)$ pomiędzy otworem bocznie wierconym o średnicy d i echem dna w odległości s można opisać jako:

$$\Delta V(OBW) = 10 \cdot \log \left(\frac{2s}{d} \right)$$

W polu dalekim ($s > 3N$) jest także możliwe przekształcenie średnicy bocznie wierconego otworu $D(SDH)$ na drodze s na odpowiadającą średnicę reflektora płaskiego, np. otwór płaskodenny $D(OP)$ i odwrotnie:

$$D(OP) = \sqrt{0.45 \cdot \lambda \sqrt{D(OBW)} \cdot s}$$

Jak widać konwersja zależy od długości fali na drodze s i ze wzrastającą odległością s wielkość równoważnego reflektora płaskiego $D(OP)$ wzrasta także.

Wymagania w stosunku do wzorca z otworem bocznie wierconym:

1) średnica $D(OBW)$ powinna być większa niż 1,5 razy długość fali

$$D(OBW) > 1,5 \lambda$$

2) szerokość c wzorca jak i długość otworu musi spełniać następujące wymagania

$$c > 2s \cdot \frac{\lambda}{D_o}$$

gdzie:

- s – odległość od otworu
- λ – długość fali
- D_o – średnica przetwornika.

Wysokość echa bocznie wierconego otworu $H(OBW)$ jest funkcją jego średnicy $D(OBW)$

$$H(OBW) \approx \sqrt{D(OBW)}$$

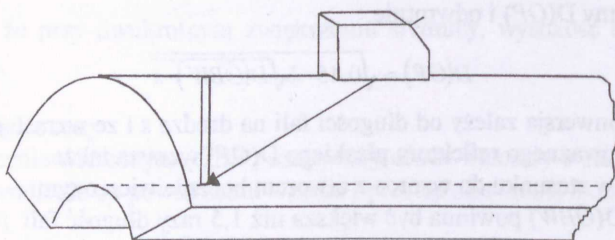
Jak widać z tej zależności, jeżeli średnicę otworu zwiększymy dwa razy, to wysokość echa wzrośnie o 3 dB, gdyż

$$20 \cdot \log \sqrt{2} = 2.98 \approx 3$$

Otwór wiercony prostopadle

Reflektor ten jest stosowany głównie do kalibracji i ustawiania czułości w przypadku badań automatycznych rur spawanych wzdłużnie lub okrężnie. Otwór ten jest wiercony dokładnie prostopadle do spoiny (rys. 71).

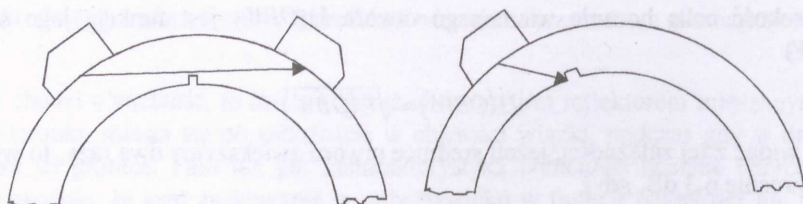
Wysokość echa od takiego reflektora nie może być bezpośrednio przeniesiona na wysokość echa od dna czy płaskiego reflektora, ponieważ charakterystyka odbiciowa naroża prostokątnego na końcu otworu jest bardzo złożona. Dlatego korelacja z innymi reflektorami określana jest tylko doświadczalnie.



Rys. 71. Sposób wykonania otworu wierconego prostopadle

Nacięcie prostokątne

Ten typ reflektora nie jest często stosowany jako reflektor odniesienia przy ustawianiu czułości, ale jest bardzo użyteczny przy określaniu obrysu powierzchni, zwłaszcza w przypadku skomplikowanej geometrii badanej próbki (rys. 72).



Rys. 72. Wykorzystanie nacięcia prostokątnego jako reflektora odniesienia

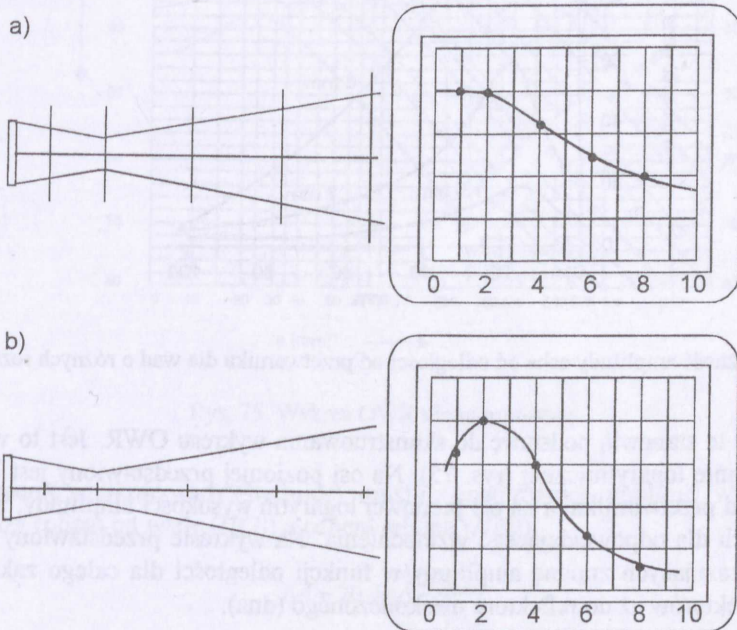
Amplituda echa od takiego nacięcia zależy przede wszystkim od kształtu nacięcia, częstotliwości (rodzaju fali) zastosowanej głowicy i kąta padania. Częściej wykorzystywany jest ten typ reflektora przy badaniach automatycznych rur.

5.1.2. Metoda OWR

Metoda OWR (odległość -wzmocnienie -rozmiar), w języku angielskim nosi nazwę DGS (Distance-Gain-Size) a w niemieckim AVG (Abstand-Verstärkung-Größe).

Ocenę wielkości wady tą metodą przeprowadza się za pomocą tzw. wykresów OWR. Wykresy te są tak skonstruowane, że umożliwiają przy ocenie wielkości wady uwzględnienie również odległości wady od przetwornika. W celu przybliżenia zależności między wysokością echa reflektora wzorcowego a odległością od przetwornika zapoznamy się z rys. 73.

Na rysunku 73a przedstawiona jest zmiana amplitudy echa w różnych odległościach od przetwornika dla wady dużej (przekraczającej średnicę wiązki) tzw. dna. Jak widać, gdy reflektor znajduje się w polu bliskim, echo pozostaje prawie niezmienione, ponieważ cała energia dźwięku odbija się od niego i powraca do przetwornika. Kiedy reflektor znajduje się w polu dalekim, ze wzrastającą odległością od przetwornika maleje amplituda echa wiązki odbitej. Wynika to z geometrii wiązki, która w polu dalekim jest rozbieżna i odbijając się od wady ulega dalszemu poszerzeniu, tak więc część energii dźwięku nie trafia do przetwornika. W polu dalekim wysokość echa jest odwrotnie proporcjonalna do odległości. W przypadku małych reflektorów tylko część wiązki dźwięku ulega odbiciu od ich powierzchni. Dlatego ilość energii dźwięku odbitej z powrotem do głowicy wynika ze stosunku pola powierzchni reflektora i przekroju poprzecznego wiązki w miejscu występowania reflektora.



Rys. 73. Zależność amplitudy echa od odległości wady od przetwornika: a – dla wady dużej (dna), b – dla wady małej

Jak widać z rys. 64b, maksymalna amplituda echa wady małej występuje w odległości jednej długości pola bliskiego z powodu skupienia wiązki dźwięku. Dla odległości bliższych lekko spada, a dla większych (w obszarze pola dalekiego) spada znacznie ostrzej niż to było w przypadku echa dna.

W polu dalekim dla małych reflektorów obowiązuje następująca zależność:

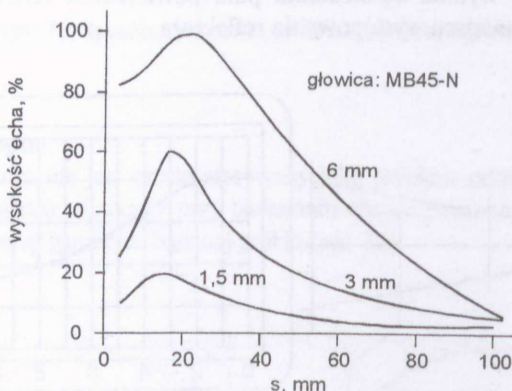
$$\text{wysokość echa} \approx \frac{1}{s^2} \text{ oraz } \approx D^2$$

gdzie:

D – średnica reflektora

s – odległość reflektora od przetwornika.

Amplitudę echa znanego płaskiego reflektora kołowego można przedstawić w funkcji odległości od przetwornika – rys. 74.



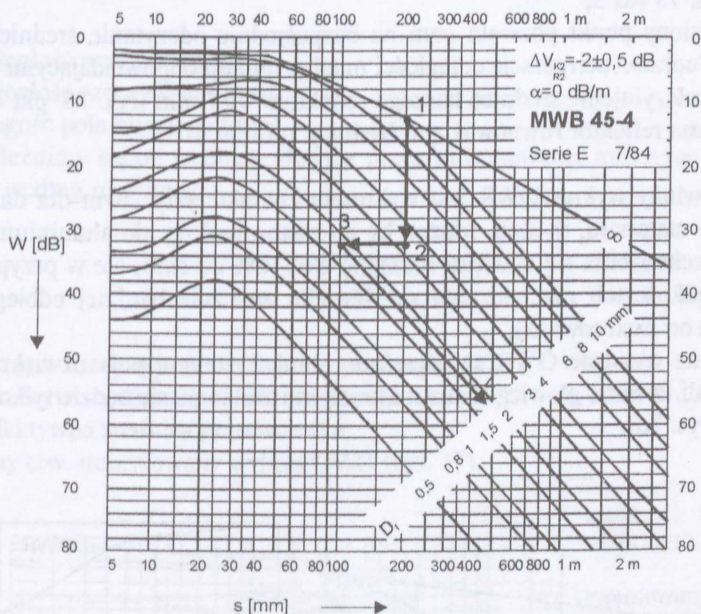
Rys. 74. Zależność amplitudy echa od odległości od przetwornika dla wad o różnych rozmiarach

Wykresy te stanowią podstawę do skonstruowania wykresu OWR. Jest to wykres w skali podwójnie logarytmicznej (rys. 75). Na osi poziomej przedstawiony jest logarytm odległości od przetwornika, a na osi pionowej logarytm wysokości amplitudy, wyrażony w decybelach dla odpowiadającego wzmocnienia. Na wykresie przedstawiony jest szereg linii obrazujących zmianę amplitudy w funkcji odległości dla całego zakresu wymiarów reflektorów aż do reflektora nieskończonego (dna).

Przykład:

Założmy, że badamy próbkę o grubości ścianki 200 mm. Próbkę ma wadę sztuczną – płaskodenny otwór na głębokości 100 mm. Znajdujemy wadę skanując powierzchnię próbki i ustawiamy głowicę w takie położenie, przy którym amplituda echa od wady jest maksymalna. Oznacza to, że znalazła się ona dokładnie w osi wiązki. Odczytujemy z ekranu głębokość położenia wady (ścieżkę dźwięku s) oraz amplitudę echa (% wysokości ekranu). Naszym celem teraz jest ocena wymiaru (średnicy) naszej wady na podstawie porównania amplitudy echa nieznanego reflektora z amplitudą echa reflektora znanego – reflektora odniesienia.

W naszym przykładzie wygodnie jest zastosować jako reflektor odniesienia dno próbki, gdyż na wykresie również mamy zobrazowaną krzywą odpowiadającą temu reflektorowi. Zaznaczamy na krzywej od dna, dla odległości 200 mm (grubość naszej próbki) tzw. punkt odniesienia (rys. 75 pkt 1).



Rys. 75. Wykres OWR nieunormowany

Aby ocenić wielkość wady (średnicę), musimy znać różnicę amplitud (wzmocnień w dB) między echem od wady ($H(2)$) a echem od dna ($H(1)$)

$$\Delta A = 20 \cdot \log \left[\frac{H(2)}{H(1)} \right]$$

Aby ocenić tę wartość, postępujemy w następujący sposób:

- 1) echo od reflektora odniesienia ustawiamy na 80% wysokości ekranu $H(1) = 80\%$,
- 2) odczytujemy odpowiadającą temu wartość wzmocnienia, np. $W(1) = 14$ dB,
- 3) skanujemy powierzchnie badanej próbki aż do znalezienia maksymalnej amplitudy badanej wady,
- 4) zwiększamy wzmocnienie aż echo od wady osiągnie wysokość 80% ekranu,
- 5) odczytujemy ponownie odpowiadające tej sytuacji wzmocnienie, np. $W(2) = 34$ dB,
- 6) wiemy więc, że echo od badanej wady może osiągnąć tę samą wysokość na ekranie po wzmocnieniu o +20 dB

$$\Delta W = W(2) - W(1) = 34 \text{ dB} - 14 \text{ dB} = 20 \text{ dB}$$

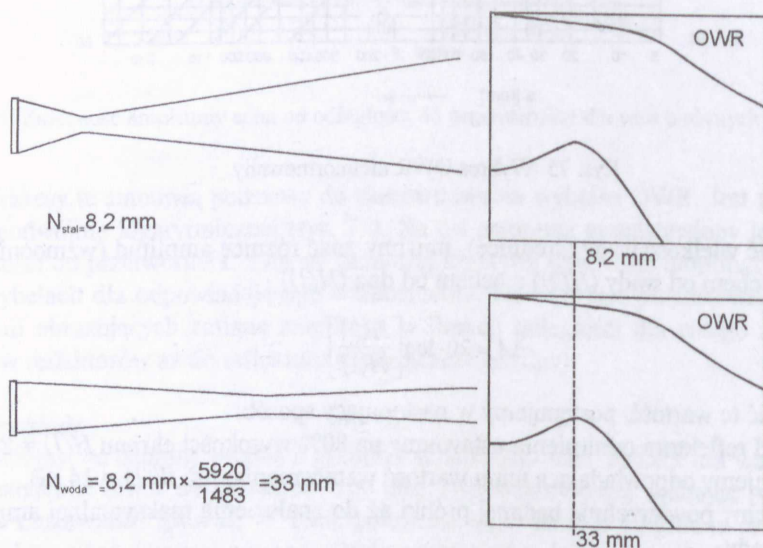
7) zmierzoną różnicę wzmocnienia nanosimy na diagramie dla danej głowicy od punktu odniesienia (na krzywej od echa dna) w kierunku wzrastającego wzmocnienia na wykresie) – rys. 75 pkt 2,

8) ponieważ badana wada znajduje się w odległości 100 mm, przesuwamy się na wykresie poziomo w lewo, aby znaleźć się na linii pionowej odpowiadającej odległości 100 mm, rys. 75 pkt 3,

9) znaleziony punkt pozwala nam na bezpośrednie odczytanie średnicy badanego reflektora. Poprzez interpolację odległości między liniami odpowiadającymi reflektorom 1,5 i 2 mm odczytujemy średnicę naszego reflektora $\approx 1,7$ mm (rys. 75. pkt 4). Oznacza to, że wada ma reflektor równoważny o średnicy 1,7 mm.

Przedstawiony wykres OWR jest wykresem charakterystycznym dla danej głowicy i dla danego materiału, tj. stali. Można by go zastosować np. do aluminium, w którym prędkość rozchodzenia się dźwięku różni się o ok. 6% od stali, ale w przypadku materiałów o prędkościach rozchodzenia się dźwięku znacznie bardziej odbiegających od stali, nie ma on zastosowania.

Krzywe na wykresie OWR są zdeterminowane kształtem pola dźwięku. Jeżeli będziemy badali tą samą głowicą różne materiały, to zmieniać się będzie tylko skala odległościowa (rys. 76).



Rys. 76. Zmiany na wykresie OWR dla danej głowicy w zależności od badanego ośrodka

Skala odległości wykresu OWR zależy od długości pola bliskiego wiązki dźwięku w badanym materiale. Jeżeli skalę odległościową przeliczymy na długość pola bliskiego (co niezależni nas od prędkości rozchodzenia się dźwięku w materiale) według zależności:

$$D = \frac{s}{N}$$

gdzie:

D – odległość unormowana,

s – odległość rzeczywista [mm],

N – długość pola bliskiego [mm],

oraz niezależnymi się od średnicy głowicy przez unormowanie krzywych od płaskich reflektorów według równania:

$$s = \frac{d}{D_{ef}}$$

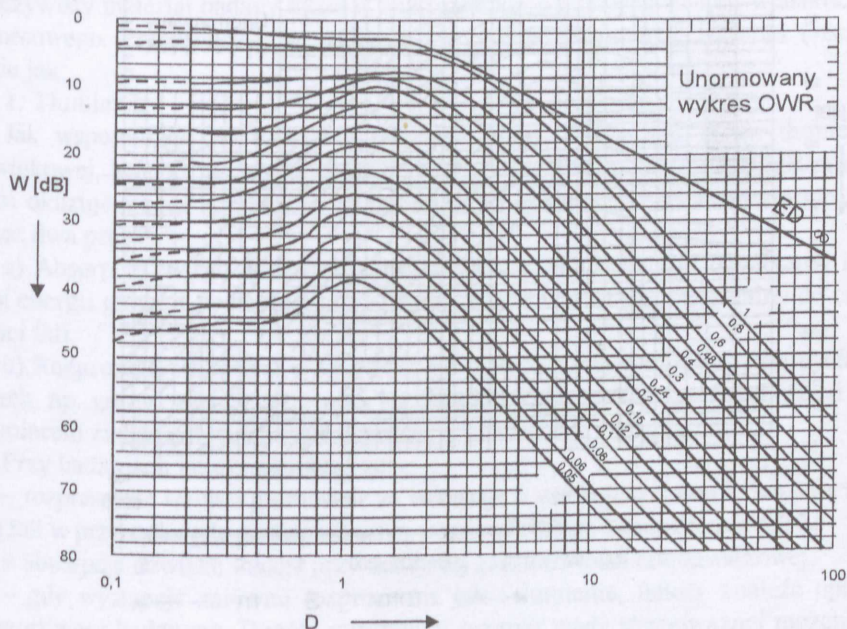
gdzie:

s – unormowany rozmiar reflektora płaskiego,

d – rzeczywisty rozmiar reflektora [mm],

D_{ef} – efektywna średnica przetwornika.

to otrzymamy tzw. unormowany wykres OWR (rys. 77).



Rys. 77. Unormowany wykres OWR

Wykorzystując taki wykres do oceny wielkości wady w danym materiale trzeba pamiętać, że najpierw należy policzyć długość pola bliskiego dla danego materiału. Skalę odległości należy przekształcić na skalę rzeczywistych odległości mnożąc wszystkie wartości przez długość pola bliskiego wiązki w badanym materiale, a unormowana średnica reflektora płaskiego s musi być pomnożona przez efektywną średnicę przetwornika dla zastosowanej głowicy.

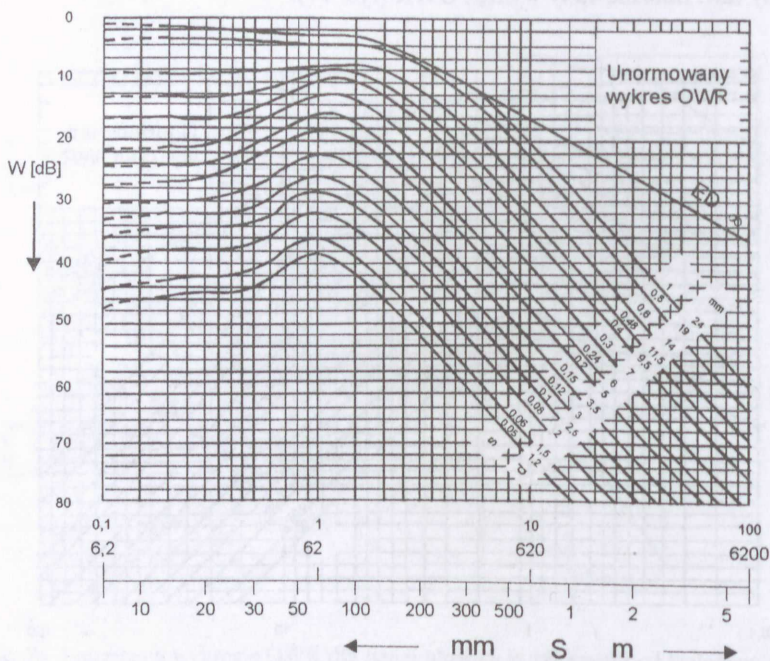
Przykład:

Stosujemy unormowany wykres OWR do badania mosiądzu z użyciem głowicy normalnej B2S. Głowica ta ma średnicę $D_o = 24$ mm i częstotliwość 2MHz. Prędkość dźwięku w mosiądzu jest $c_L = 4400$ m/s.

Długość pola bliskiego dla mosiądzu wynosi więc:

$$N_{\text{Mosiądz}} = \frac{24^2 \cdot 2}{4 \cdot 4400} = 62 \text{ mm}$$

Oznacza to, że dystans na unormowanej skali odległości wykresu $D = 1$ odpowiada 62 mm rzeczywistej ścieżki dźwięku, a na skali rozmiaru reflektora $s = 1$ odpowiada $d = 24$ mm średnicy reflektora odniesienia (rys. 78).



Rys. 78. Unormowany wykres OWR z naniesionymi obliczonymi wartościami d i s dla mosiądzu

Stosując badania ultradźwiękowe w praktyce, nie jesteśmy zazwyczaj zainteresowani oceną wad sztucznych takich jak płaskie okrągłe wady, lecz wad rzeczywistych takich jak: pory, wtrącenia, jamy skurczowe, pęknięcia itd. Po wykryciu takiej wady istotna jest ocena jej wielkości, gdyż tylko w ten sposób jesteśmy w stanie określić czy nieciągłość jest wadą, tzn. czy ma negatywny wpływ na właściwą pracę badanego elementu. Jest oczywiste, że takie naturalne wady nigdy nie będą miały geometrii takiej jak sztuczna, płaska, okrągła wada.

Pytanie więc należałoby postawić następująco: czy za pomocą wykresu OWR możemy ocenić rzeczywisty rozmiar takich wad naturalnych jak pory, pęknięcia czy jamy skurczowe? Odpowiedź musi brzmieć nie. Wynika to z faktu, że amplituda echa każdego reflektora zależy nie tylko od jego rozmiaru, ale także od jego kształtu, pochylenia w stosunku do osi padania fali ultradźwiękowej, chropowatości jego powierzchni i szeregu innych własności, np. anizotropii.

To, co się rzeczywiście określa stosując wykres OWR, to rozmiar wady równoważnej (ekwiwalentnej). Dlatego stosując wykresy OWR do oceny wielkości wady należy zawsze pamiętać, że:

- ocena wielkości wady metodą OWR określa wielkość wady równoważnej dla rzeczywistego defektu, ale wyniki takiej oceny uwzględniają wpływ wielkości i odległości wady na amplitudę echa, a więc są dlatego powtarzalne i obiektywne,

- wyniki oceny wady nie odpowiadają rzeczywistym rozmiarom wady.

Wykorzystując metodę OWR do oceny wielkości wady należy również pamiętać, że rzeczywisty materiał badany może w znaczny sposób odbiegać swoimi własnościami od wzorcowego. Przeprowadzając badania należy więc uwzględnić warunki rzeczywiste, takie jak:

1. Tłumienie

Jak wspomniano w rozdziale i materiały mogą wykazywać różne tłumienie fali dźwiękowej, którego miarą jest współczynnik tłumienia α [dB/m] lub [dB/mm]. Czasami okazuje się, że nie można go pominąć. Tłumienie jest zdeterminowane głównie przez dwa procesy:

a) Absorpcję energii dźwięku, polegającą na zamianie energii dźwięku w inny rodzaj energii głównie w ciepło. Stopień zamiany jest wprost proporcjonalny do częstotliwości fali.

b) Rozproszenie dźwięku występujące na małych równomiernie rozłożonych reflektorach, np. granice ziaren, wtrącenia itd. Stopień rozproszenia zależy od relacji między rozmiarem ziaren i długością fali impulsu.

Przy badaniach należy pamiętać że:

- rozpraszanie wzrasta gwałtownie ze wzrastającą wielkością ziaren lub malejącą długością fali w przypadku gdy granice ziaren są w zakresie 0,1 do 1 razy długość fali λ ;

- absorpcja dźwięku maleje przy malejącej częstotliwości fali dźwiękowej;

- gdy występuje zarówno rozproszenie jak i tłumienie, należy znaleźć optymalną częstotliwość badawczą. Dopóki minimalny rozmiar wady równoważnej możemy uważać za duży w stosunku do wielkości ziarna, dopóty obniżenie częstotliwości może poprawić wykrywalność wad;

– wadę możemy uważać za wykrywalną, jeżeli jej rozmiar jest większy lub równy 1/5 długości fali w drobnopowierzchniowych materiałach.

Przy badaniach falą podłużną w zakresie do 5 MHz wpływ tłumienia jest zazwyczaj pomijany dla niskostopowych, kutek stali, dla niskostopowych odlewów aluminium i magnezu, dla szkła i porcelany (współczynnik tłumienia jest poniżej 10 dB/m) W przypadku innych materiałów (tablica 8) dla których współczynnik tłumienia jest większy od 10 dB/m., nie można strat tłumienia pominąć.

Żeby uwzględnić (skompensować) straty tłumienia, oceniając wady musimy znać współczynnik tłumienia α zarówno dla próbki badanej jak i wzorca.

Korekcja tłumienia zazwyczaj nie jest potrzebna, jeżeli badamy stale niskowęglowe za pomocą głowic prostych. Średnia wartość współczynnika α dla walcowanych stali niskowęglowych może wynosić:

$\alpha < 2$ dB/m dla 2 MHz fali podłużnej,

$\alpha = 5-10$ dB/m dla 4 MHz fali podłużnej.

Tłumienie zaczyna odgrywać znacznie większą rolę w przypadku zastosowania głowic kątowych. Fala poprzeczna, ze względu na inny sposób rozchodzenia się, ulega tłumieniu znacznie silniej i nawet dla niskostopowych stali nie może to być pominięte. Współczynniki tłumienia mogą wynosić:

$\alpha = 6-12$ dB/m. Dla 2 MHz fal poprzecznych,

$\alpha = 40-80$ dB/m. Dla 4 MHz fal poprzecznych.

Wielkość strat tłumienia określamy z zależności:

$$\Delta W_T = 2[s(R) \cdot \alpha(m) - s(ref) \cdot \alpha(ref)]$$

gdzie:

$S(R)$ – odległość reflektora od przetwornika,

$\alpha(m)$ – współczynnik tłumienia materiału badanego,

$s(ref)$ – grubość wzorca (odległość reflektora odniesienia we wzorcu),

$\alpha(ref)$ – współczynnik tłumienia wzorca.

2. Stan powierzchni próbki badanej

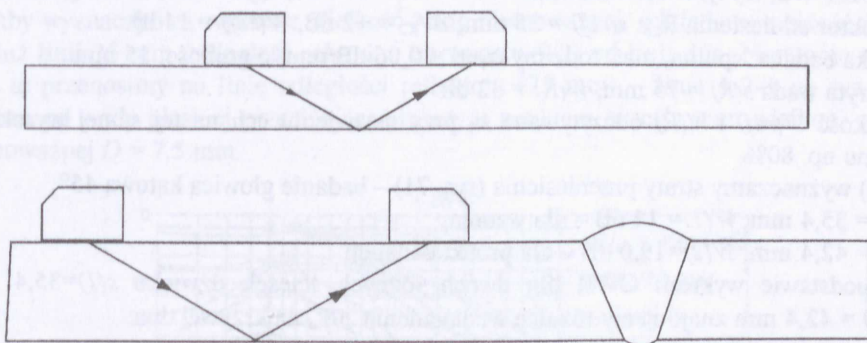
W niektórych przypadkach, gdy stan powierzchni próbki badanej (chropowatość) znacznie odbiega od warunków powierzchniowych wzorca, trzeba również uwzględnić przy pomiarach poprawki, tzw. *straty przeniesienia* ΔW_p .

Wielkość tę wyznacza się dokonując pomiarów wzmocnienia metodą przepuszczania dwiema głowicami kątowymi tego samego rodzaju (najczęściej 45°) na próbce badanej i wzorcowej (rys. 79).

Ustawiamy głowice na przeciw siebie, najpierw na wzorcu a później na próbce badanej, przesuwając wzajemnie aż do uzyskania maksymalnego echa. Ustawiamy każdorazowo rejestrowane echo na 80% wysokości ekranu i odczytujemy wzmocnienie $W1$ i $W2$.

Wielkość *strat przeniesienia* określamy jako:

$$\Delta W_p = W_2 - W_1$$



Rys. 79. Sposób wyznaczania strat przeniesienia: a – pomiar wzmocnienia echa dna na wzorcu, b – na próbce badanej

W przypadku gdy próbka wzorcowa i badana różnią się grubością, należy jeszcze uwzględnić tzw. *straty rozproszenia*. Dokonujemy tego za pomocą wykresu OWR, odczytując różnicę wzmocnienia na krzywej dna dla dwóch różnych odległości:

$$\Delta W_r = W_{S2} - W_{S1}$$

Całkowita wartość strat przeniesienia wyniesie więc:

$$\Delta W_p = W_2 - W_1 + \Delta W_r$$

3. Geometria wzorca

W przypadku stosowania głowic kątowych możemy spotkać się z koniecznością wprowadzenia dodatkowej korekty, tzw. *korekcji echa dna* ΔV_{K1} lub ΔV_{K2} . Poprawka ta wynika z faktu, że zazwyczaj biorąc jako echo odniesienia echo dna stosujemy w przypadku głowic kątowych nie płaską powierzchnię (jak dla głowic prostych), ale walcową powierzchnię wycinka kołowego. Wielkość tej poprawki jest wielkością stałą dla danego rodzaju głowicy i wynika z jej kąta. Na wykresach OWR załączonych przez producenta, jest ona podana w ramce jako wartość ΔV_{K2R25} i oznacza, że jest to poprawka wynikająca z zastosowania jako echa dna, echa od powierzchni walcowej na wzorcu W2 w kierunku promienia R25. Wartość ta musi być dodana do zarejestrowanej wielkości odniesienia.

Biorąc pod uwagę wszystkie poprawki jakie należy wprowadzić, rejestrowaną różnicę wzmocnienia można przedstawić jako

$$\Delta W = W_{K1/2} + \Delta W_p + \Delta W_T$$

Przykład:

Głowica MWB 70-4 ($\beta = 70^\circ$, $f = 4$ MHz)

Wzorzec W2, $\alpha(ref) = 0,04$ dB/mm

Reflektor odniesienia R₂₅: $s(ref) = 25$ mm, $\Delta V_{K2} = +2$ dB, $W(ref) = 14$ dB

Próbka badana: spoina, mat. rodzimy $\alpha(m) = 0,06$ dB/mm, o grubości 15 mm

Wykryta wada $s(R) = 75$ mm, $W(R) = 32$ dB

Wielkość $W(ref)$ i $W(R)$ odczytywane są przy ustawieniu ech na tej samej wysokości ekranu np. 80%.

a) wyznaczamy straty przeniesienia (rys. 71) – badanie głowicą kątową 45°
 $s(1) = 35,4$ mm, $W(1) = 14$ dB – dla wzorca,

$s(2) = 42,4$ mm, $W(2) = 19,0$ dB – dla próbki badanej.

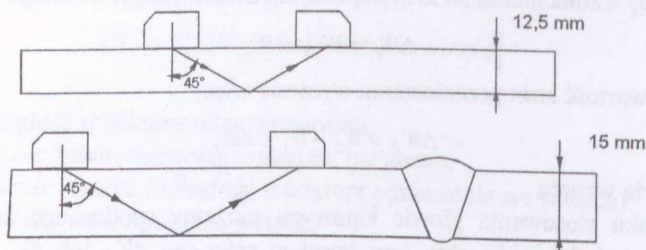
Na podstawie wykresu OWR dla dwóch różnych ścieżek dźwięku $s(1) = 35,4$ mm i $s(2) = 42,4$ mm znajdujemy różnicę wzmacnienia ΔW_d na krzywej dna:

$$\Delta W_r = W_{s2} - W_{s1} = 3 - 2 = 1 \text{ dB}$$

$$\Delta W_P = W_2 - W_1 + \Delta W_r = 19 - 14 + 1 = 6 \text{ dB}$$

b) Obliczamy poprawkę na tłumienie

$$\Delta W_T = 2[0,06 \cdot 75 - 0,04 \cdot 25] = 7 \text{ dB}$$



Rys. 80. Wyznaczanie strat przeniesienia dla badanej spoiny

Poprawki:

$$\Delta W_{K2} = +2 \text{ dB}$$

$$\Delta W_P = +6 \text{ dB}$$

$$\Delta W_T = +7 \text{ dB}$$

Oznacza to, że zmierzona wielkość wzmacnienia dla wady $W(R)$ musi być pomniejszona o te poprawki albo wartość odniesienia $W(ref)$ powiększona, aby można było dokonać właściwego ich porównania. (rys. 81).

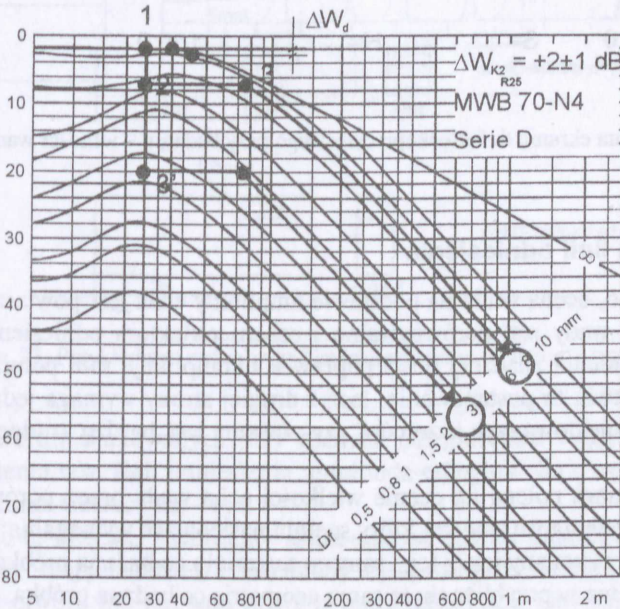
Dopiero tak skorygowaną wartość możemy użyć do określenia wielkości wady równoważnej

$$W_{skor} = W(ref) + \Delta W_{K2} + \Delta W_P + \Delta W_T = 14 + 2 + 6 + 7 = 27 \text{ dB}$$

$$\Delta W = W(R) - W_{skor} = 32 - 27 = 5 \text{ dB}$$

Oznacza to, że impuls echa od wady (tylko ze względu na różnicę wielkości) musi być wzmocniony o 5 dB, aby osiągnąć ten sam poziom na ekranie co echo dna.

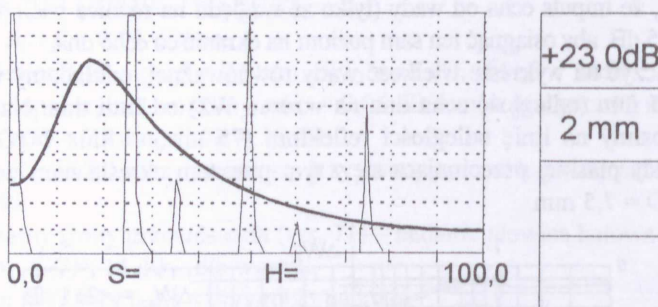
Aby wyznaczyć na wykresie wielkość wady równoważnej, odkładamy wartość 5 dB wzdłuż linii 25 mm (odległość echa dna na wzorcu W2) od linii dna. Następnie wielkość tę przenosimy na linię odległości reflektora (75 mm) – linia 1-2-3 na rys. 81. Krzywa od wady płaskiej przecinająca się z tym punktem określa nam wielkość wady równoważnej $D = 7,5 \text{ mm}$.



Rys. 81. Określanie wielkości wady na podstawie wykresu OWR

Należy zwrócić uwagę, iż gdybyśmy nie zastosowali obliczonych poprawek, wielkość wady oceniona w ten sposób wynosiłaby $D = 2,8 \text{ mm}$ (linia 1-2-3' na rys. 81) byłaby więc znacznie zaniżona.

W niektórych defektoskopach cyfrowych skale OWR znajdują się w pamięci urządzenia. Określone wcześniej poprawki, wynikające ze strat tłumienia i przeniesienia, wprowadza się również do pamięci urządzenia i są one automatycznie uwzględniane w czasie pomiaru. Porównania czy nasza wada jest większa czy mniejsza od wady odniesienia dokonujemy przez porównanie na ekranie monitora echa pochodzącego od badanej wady i wywołanej na ekranie linii wykresu OWR dla danej wady odniesienia (rys. 82).



Rys. 82. Obraz na ekranie defektoskopu cyfrowego przy badaniu wielkości wady metodą OWR

5.1.3. Metoda linii odniesienia

Jak wiadomo, ocena wady na podstawie amplitudy echa jest powtarzalna tylko wtedy, jeżeli echo wady jest porównywalne z echem reflektora odniesienia. Wymaga to często uwzględnienia znacznej ilości poprawek i komplikuje sam pomiar. Metoda linii odniesienia ułatwia to postępowanie, lecz z drugiej strony wymaga jednego lub więcej specjalnie zaprojektowanych wzorców, co czasami jest bardzo trudne do wykonania i kosztowne.

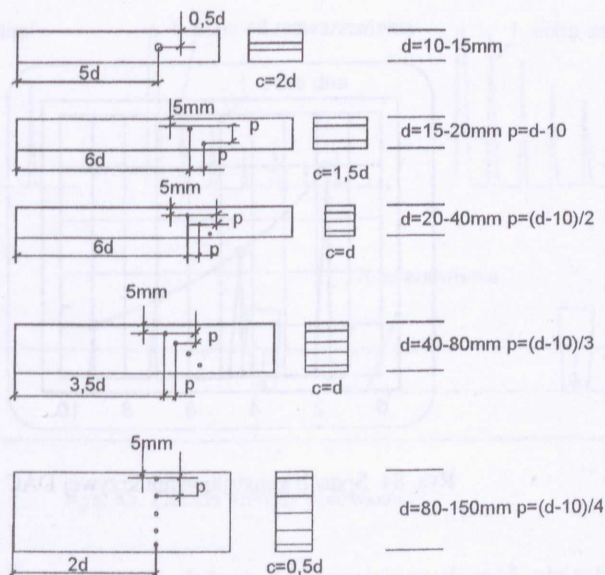
Zasada pomiaru polega na ocenie wielkości echa wady przez porównanie z echem reflektora odniesienia we wzorcu, który spełnia następujące wymagania:

1. Wzorec wykonany jest z tego samego materiału co badana próbka.
2. Wzorec ma w przybliżeniu tę samą geometrię co badana próbka.
3. Wzorec ma takie same warunki powierzchniowe jak badana próbka.
4. Reflektor odniesienia powinien być w przybliżeniu tej samej wielkości co badana wada.

Jeżeli spełnimy powyższe wymagania, nie ma potrzeby przeprowadzania korekcji amplitudy echa, gdyż jak widać wszystkie czynniki wpływają jednakowo na echo wady i echo reflektora odniesienia.

W przypadku zastosowania tej metody, pomiar znacznie się upraszcza i wprawa operatora może być mniejsza niż to było w przypadku metody OWR.

Ta metoda wymaga stosowania wzorców zawierających jeden lub więcej bocznie wierconych otworów o tej samej średnicy skanowanych z różnych odległości – rysunek 83.



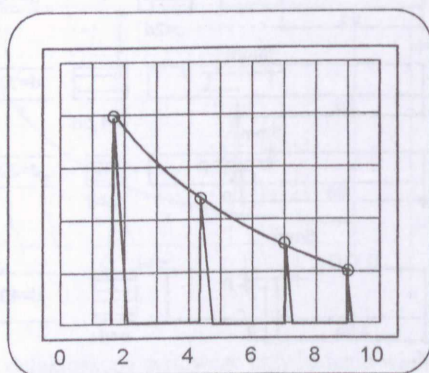
Rys. 83. Przykładowe sposoby wykonania wzorców do metody wzorca

Echa od otworów skanowanych przy różnych odległościach służą do wykreślenia krzywej odniesienia tzw. linii odniesienia amplituda-odległość (krzywej DAC – z ang. Distance-Amplitude-Correction) – rys. 84.

Wyznaczając tę krzywą, zaczynamy skanować od otworu dającego najwyższy pik (zazwyczaj otwór leżący najbliżej) i ustawiamy wysokość pików na 80%. Następnie skanujemy kolejne otwory lub ten sam otwór z innej odległości. Obwiednia uzyskanych pików stanowi krzywą pomiarową, która rysowana jest na ekranie (przy aparatach cyfrowych) lub nanoszona ręcznie na specjalne skale nakładane na ekran (urządzenia analogowe). Następnie w czasie badań określa się różnicę we wzmacnieniu między echem badanego reflektora a zarejestrowaną krzywą odniesienia.

Większość ze standardów ASTM (American Society for Testing and Materials) do badań ultradźwiękowych odlewów, odkuwek i złączy spawanych opiera się na wykorzystaniu metody linii odniesienia. Zazwyczaj zastosowanie takich wzorców do indywidualnych pomiarów nie spełnia wymagań stawianym im, głównie ze względu na odmienne własności akustyczne w stosunku do próbki badanej. W takich przypadkach należy zastosować którąś z korekcyjnych wzmacnienia wspomnianych w rozdziale o metodzie OWR.

Metoda ta jest szczególnie przydatna w przypadku próbek o bardzo skomplikowanej geometrii, gdzie może wystąpić interferencja oraz zakłócone rozchodzenie się fal.



Rys. 84. Sposób konstruowania krzywej DAC

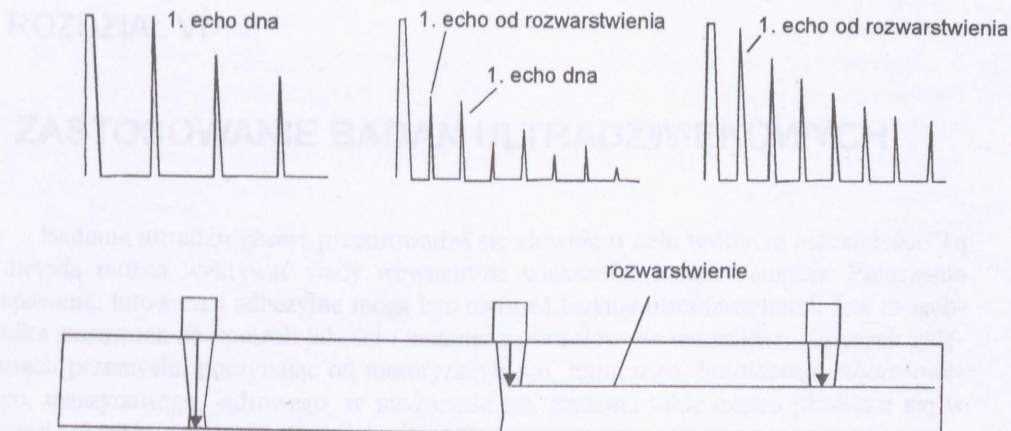
5.2. Badanie dużych wad

Zasięg dużych wad, głównie dwuwymiarowych wad równoległych do powierzchni próbek można wyznaczyć skanując ich obszar. Można przyjąć, że jeżeli płaski reflektor pokrywa połowę wiązki dźwięku, powoduje to obniżenie o połowę (6 dB) echa dna. Lecz także echo dna od wady jest obniżone samo w sobie w stosunku do przypadku, gdy wiązka dźwiękowa odbija się całkowicie od wady. Zjawisko to wykorzystuje się do oceny dużych wad w celu ustalenia ich zasięgu. Jest to tzw. metoda połówkowa.

Przeprowadzając badania, skanujemy powierzchnię próbki. Po zlokalizowaniu wady szukamy takiego położenia głowicy, przy którym obserwowany jest 6 dB spadek wysokości echa od wady. W tym położeniu oś akustyczna wiązki bardziej lub mniej dokładnie leży nad krawędzią wady (rys. 85). Takie położenie głowicy zaznaczamy na górnej powierzchni próbki.

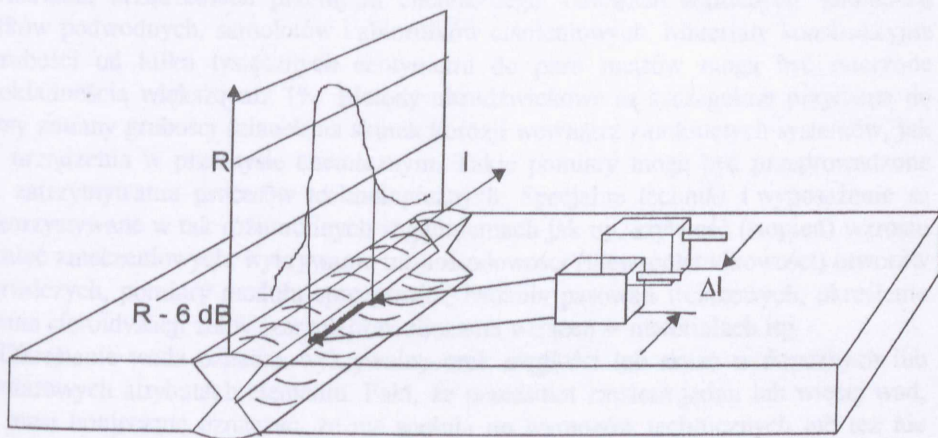
Czasami przy stosowaniu metody połówkowej pewne elementy wady nie mogą być określone i otrzymujemy wtedy mniejszy niż w rzeczywistości zasięg wady.

Aby zwiększyć pewność co do rzeczywistego zasięgu wady, zamiast metody połówkowej możemy zastosować metodę 10%, tzn. rejestrujemy położenie głowicy, kiedy obserwujemy 20 dB spadek amplitudy echa od wady.



Rys. 85. Zasada metody połówkowej

Metody te stosowane są do oceny dużych dwuwymiarowych wad, ale także w przypadku oceny długości wady liniowej występującej np. w spoinie (rys. 86).



Rys. 86. Wykorzystanie metody połówkowej do oceny zasięgu długich wad w spoinach

ROZDZIAŁ VI

ZASTOSOWANIE BADAŃ ULTRADŹWIĘKOWYCH

Badania ultradźwiękowe przeprowadza się głównie w celu wykrycia nieciągłości. Tą metodą można wykrywać wady wewnętrzne większości metali i stopów. Połączenia spawane, lutowane i adhezyjne mogą być również badane ultradźwiękami. Jest to technika stosowana do kontroli jakości i badania materiałów we wszystkich głównych gałęziach przemysłu, poczynając od motoryzacyjnego, lotniczego, hutniczego, stoczniowego, maszynowego, jądrowego, w medycynie itd. Badania takie często prowadzi się w czasie eksploatacji urządzeń w celu zapobiegania awariom.

Metodami ultradźwiękowymi można wykryć wady właściwe dla materiału surowego lub wynikające z procesu wytwarzania czy obróbki cieplnej albo też pojawiające się podczas eksploatacji na skutek zmęczenia, udaru, ścierania, korozji lub innych przyczyn. Mogą to być: pustki, pęknięcia, wtrącenia, jamy skurczowe, rozwarstwienia, nieciągłości, rozerwania i płatki.

Badania ultradźwiękowe mogą być stosowane również do pomiarów grubości, np. w rafineriach, urządzeniach przemysłu chemicznego, odlewach stalowych, kadłubach statków podwodnych, samolotów i zbiorników ciśnieniowych. Materiały konstrukcyjne o grubości od kilku tysięcznych centymetra do paru metrów mogą być mierzone z dokładnością większą niż 1%. Metody ultradźwiękowe są szczególnie przydatne do oceny zmiany grubości ścianek na skutek korozji wewnątrz zamkniętych systemów, jak np. urządzenia w przemyśle chemicznym. Takie pomiary mogą być przeprowadzone bez zatrzymywania procesów technologicznych. Specjalne techniki i wyposażenie są wykorzystywane w tak różnorodnych zagadnieniach jak np. szybkość (stopień) wzrostu pęknięć zmęczeniowych, wykrywanie mimośrodowości (niewspółśrodkowości) otworów wiertniczych, pomiary modułu sprężystości, badania pasowań wciskowych, określenie stopnia sferoidyzacji żeliw szarych oraz zliczania wtrąceń w materiałach itp.

Określenie wada oznacza wykrywalny brak ciągłości lub szkodę w fizycznych lub wymiarowych atrybutach elementu. Fakt, że przedmiot zawiera jedną lub więcej wad, nie musi koniecznie oznaczać, że nie spełnia on wymogów technicznych lub też nie nadaje się do eksploatacji. Ważne jest, aby określić pewną normę decydującą o akceptacji lub odrzuceniu elementu, opartą na przewidywanym wpływie, który dana wada może mieć na trwałość użytkową danego elementu lub bezpieczeństwo.

6.1. Badanie złączy spawanych

Sposób badań, a więc również rodzaj urządzeń do badania złączy spawanych zależą od wielu czynników, takich jak:

- kształt i długość spoiny,

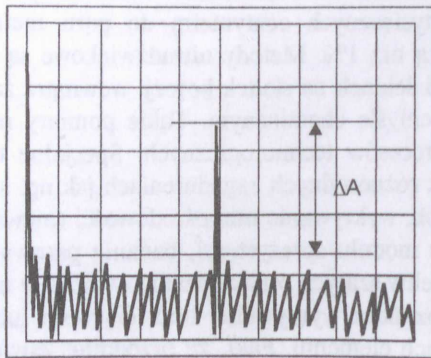
- sposób prowadzenia badań, tj. on-line lub off-line,
- sposób spawania: spiralnie, na okrągło, wzdłużnie,
- urządzenie stacjonarne przy przesuwaniu elementu spawanego,
- urządzenie ruchome przy stacjonarnym położeniu złącza spawanego.

Bez względu jednak na powyższe czynniki, wszystkie urządzenia badawcze mają pewne cechy wspólne, mianowicie wszystkie one mają za zadanie badanie takich wad jak pęknięcia (podłużne, poprzeczne i skośne), wady połączeń, wtrącenia, porowatość, wady materiału rodzimego.

Przed kontrolą spoiny konieczne jest badanie materiału rodzimego celem sprawdzenia obecności wad takich jak: rozwarstwienia i większe wtrącenia, które mogą utrudniać wykrycie, lokalizację i identyfikację oraz ocenę rozmiaru wad spawalniczych. Ponadto konieczne jest określenie grubości materiału i sprawdzenie ewentualnych (znaczących) zmian tłumienia dźwięku.

Jeżeli wady lub zmiany tłumienia zostaną wykryte w materiale rodzimym, to trzeba uwzględnić ich wpływ przy badaniu spoiny.

Technika badania zależy od rodzaju złącza spawanego, jego struktury, rozmiarów i przygotowania krawędzi. Nawet jeśli materiał rodzimy wykazuje dobrą zdolność transmisji dźwięku, absorpcja w spoinie, z powodu jej gruboziarnistości może w znaczny sposób zmniejszać przenikalność fali na skutek rozpraszania. W konsekwencji współczynnik sygnału do szumu (rys. 87), który określa wykrywalność wad, zmniejsza się i może spowodować brak wykrywalności małych wad – przyjmuje się, że współczynnik sygnału do szumu powinien być min. 6 dB, czasami mówi się o 8 dB.



Rys. 87. Określenie współczynnika sygnału do szumu

Powierzchnia próbki musi umożliwiać swobodne przesuwanie głowicy i zapewnić zadowalające (dostateczne) warunki do przesyłania fal ultradźwiękowych. Tak więc skanowana powierzchnia rodzimego metalu musi być wolna od rozprysków, zgorzeliny, zendry, brudu, rdzy i skrajnej chropowatości po każdej stronie spawu w odległości do ok. 1,25 skoku głowicy. Generalnie powierzchnie skanowane nie wymagają polerowania. Przeszlifowanie papierem ściernym zwykle wystarcza.

Obszar materiału rodzimego, przez który przechodzi dźwięk w badaniach głowicą kątową, powinien być całkowicie przebadany głowicą normalną, aby wykryć ewentualne wady jak: rozwarstwienia, które mogą wpływać na ścieżkę dźwięku głowicy kątowej.

Częstotliwość głowicy powinna być dobrana z uwzględnieniem struktury ziarnistej badanego materiału, zakresu badania, orientacji wad, wymaganej dokładności pomiarowej, własności akustycznych materiału i powinna się zawierać pomiędzy 2 a 5 MHz dla głowic kątowych (fale poprzeczne) oraz 1 a 5 MHz dla głowic prostych.

Kąt głowicy dobiera się z uwzględnieniem grubości badanego materiału, przygotowania złącza spawanego i typu wad, które trzeba wykryć.

Kąt ten dobiera się tak, aby zapewnić otrzymanie optymalnego echa od najważniejszych spodziewanych wad, np. brak przetopu bocznej ściany lub grani, pęknięcia, wtrącenia żuźlowe, porowatość itp. Konieczne jest uważne rozważenie wszystkiego, co może wytwarzać odbite fale o różnych prędkościach lub powodować transformację fali. Na powierzchniach surowych lepsza jest niższa częstotliwość z punktu widzenia sprawności (wydajności) sprzężenia. Na nierównych powierzchniach małe głowice są bardziej stabilne niż duże.

Procedura postępowania (wykrywania wad) w złączach doczołowych

Aby wykryć wszystkie możliwe wady, spoina powinna być badana na całym przekroju i wzdłuż określonej długości. Aby wykryć wady podłużne, głowica powinna być ustawiona na powierzchni kontaktowej i trzymana prostopadłe do linii środkowej spoiny. Aby zbadać całą spoinę, głowicę należy przesuwac w strefie skanowania następująco (rys. 88):

1. Przesuw poprzeczny – prostopadły do osi spoiny.

Ten ruch głowicy jest potrzebny, aby zbadać cały przekrój złącza wraz ze strefą wpływu ciepła. Jego wielkość wynosi normalnie 1,25 skoku głowicy p , gdzie $p = 2T \operatorname{tg} \beta$, T – grubość ścianki materiału rodzimego

2. Przesuw podłużny – równoległy do osi spoiny.

Przeprowadza się, aby zbadać całą długość złącza.

3. Przesuw zygzakowaty

Ruch poprzeczny i boczny powinny być odpowiednio połączone, tj. w sposób tzw. zygzakowaty, gdzie każdy kolejny ruch głowicy równoległy do kierunku spoiny nie jest większy niż szerokość przetwornika. Zapewnia penetrację całego przekroju złącza na całej długości. Odmianą tego ruchu jest ruch meandrowy – poz. 3a.

4. Przesuw ukośny głowicą pojedynczą

Ruch równoległy do osi spoiny. Głowica skierowana jest do osi spoiny pod kątem różnym od 90° . Umożliwia wykrycie płaskich wad poprzecznych.

5. Przesuw ukośny dwiema głowicami

Dwie współpracujące głowice w ruchu równoległym do osi spoiny. Głowice skierowane są skośnie do spoiny. Jedna pracuje jako nadajnik, druga jako odbiornik. Umożliwia wykrycie płaskich wad poprzecznych.

6. Ruch obrotowy – obrót głowicą wokół swej osi.

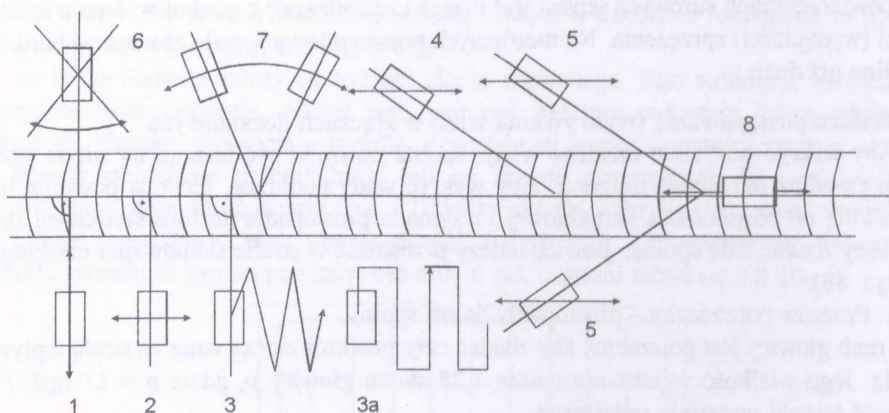
Podczas przesuwania głowicy tam i z powrotem od połączenia spawanego głowica powinna oscylować w zakresie ok. 15° w każdą stronę w celu wykrycia również takich wad, które nie są równoległe do linii centralnej spawu.

7. Ruch orbitalny

Obrót głowicy wokół wady. Umożliwia rozróżnienie rodzaju wady.

8. Przesuw po licu – równoległy do osi spoiny.

Jeżeli powierzchnia złącza spawanego jest wystarczająco gładka i płaska lub gdy zostanie obrobiona na równo z materiałem rodzimym, wtedy głowica kątowa może być ustawiona bezpośrednio na powierzchni złącza. Spoina powinna być skanowana przez przesuwanie głowicy w obu kierunkach wzdłuż linii środkowej złącza. Umożliwia wykrycie płaskich fal poprzecznych.

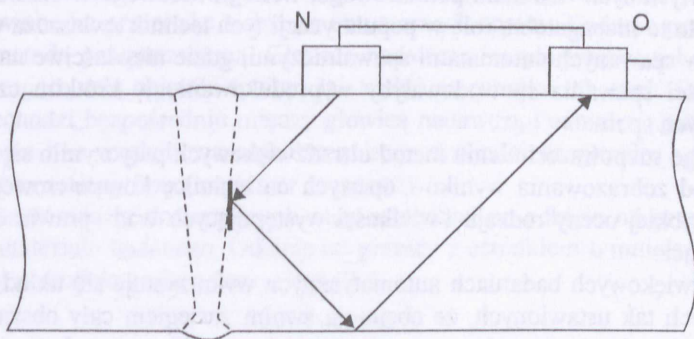


Rys. 88. Pozycje głowicy i zakresy skanowania przy badaniu spoin czołowych

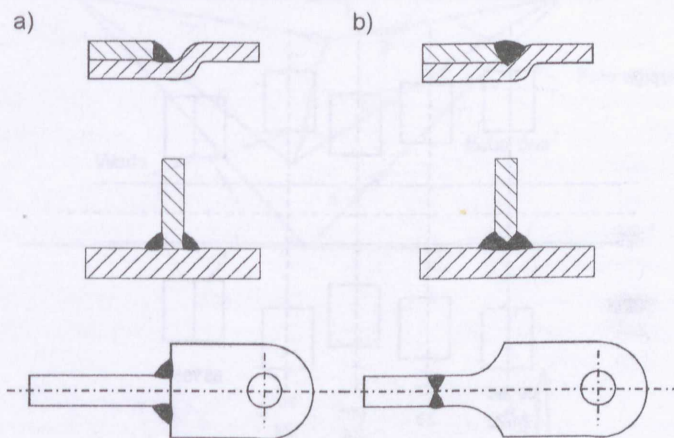
Aby badania były pełne, skanowanie powinno być przeprowadzone z obu stron złącza spawanego lub alternatywnie na obu powierzchniach z tej samej strony. Jeżeli są wątpliwości co do natury lub rozmiaru wad, konieczne może być skanowanie złącza z więcej niż dwóch pozycji, czyli z obu stron i obu powierzchni.

W przypadku grubych płyt krawędzie złącza spawanego są bardziej prostopadłe, więc do wykrycia płaskich wad umiejscowionych prawie prostopadłe do powierzchni płyty powinno się stosować tzw. technikę tandem, czyli skanowanie dwiema głowicami kątowymi 45° – rys. 89.

W przypadku badania połączeń spawanych często spotykaną obecnie praktyką jest specjalne projektowanie połączeń takich, które umożliwiłyby jak najprostsze wykonanie późniejszych badań kontrolnych czy eksploatacyjnych metodą ultradźwiękową (i nie tylko). Przykłady takich rozwiązań konstrukcyjnych pokazano na rys. 90.



Rys. 89. Skanowanie spoiny dwiema głowicami w technice tandem



Rys. 90. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych spoin ułatwiających badanie ultradźwiękowe:
a – przed modyfikacją, b – po przekonstruowaniu

Zautomatyzowane badania spoin

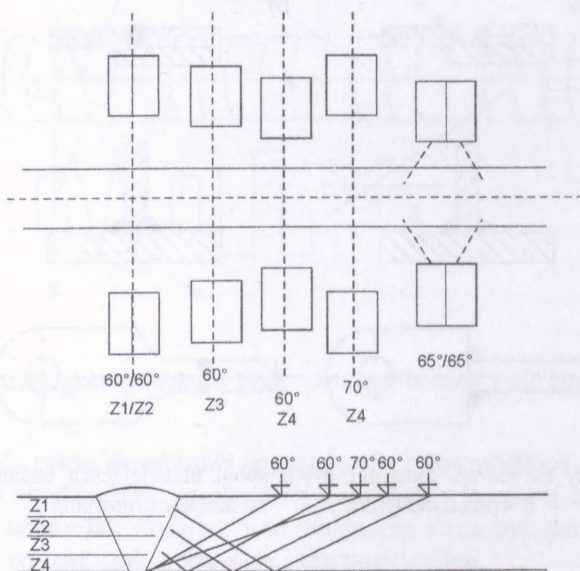
Złącza spawane stanowią ważny element w produkcji rur do transportu cieczy, gazów, zbiorników w przemyśle chemicznym i jądrowym. Jest to powód, dla którego elementy spawane podlegają badaniom nieniszczącym również w trakcie eksploatacji. Natomiast konieczność sprawdzania wielu metrów (nawet kilometrów) spoin, jak również stosowanie większej ilości głowic do pełnych badań spowodowały rozwinięcie badań automatycznych.

W badaniach rurociągów metody ultradźwiękowe wypierają stopniowo stosowane powszechnie badania radiograficzne. Wynika to z czynników zarówno ekologicznych

jak i ekonomicznych. Postęp w technikach komputerowych pozwolił na szybką analizę wyników szczytywanych z układu pomiarowego, wielogłowicowego w czasie rzeczywistym. Odegrało to niebagatelną rolę w popularyzacji tych technik zwłaszcza w przypadku rurociągów spawanych automatami spawalniczymi, gdzie niewłaściwe nastawy przy dużej szybkości spawania spowodowałyby wyprodukowanie w krótkim czasie dużej ilości wadliwych spoin.

Do dalszego rozpowszechnienia metod ultradźwiękowych przyczyniło się wdrożenie nowych metod zobrazowania wyników opartych na technice komputerowej, dających możliwość szybkiej oceny rodzaju i wielkości występujących wad prawie dla wszystkich typów złączy.

W ultradźwiękowych badaniach automatycznych wykorzystuje się układ głowic ultradźwiękowych tak ustawionych, że obejmują swoim zasięgiem cały obszar spoiny – rys. 91. Zespoły głowic ustawione są symetrycznie po obu stronach spoiny. Każda z głowic ma określony obszar skanowania i badanie całej spoiny dokonuje się w jednym przejściu. Jako ciecz sprzęgającą wykorzystuje się wodę. Wyniki rejestrowane są komputerowo i analizowane na bieżąco w odniesieniu do przyjętych kryteriów badania.

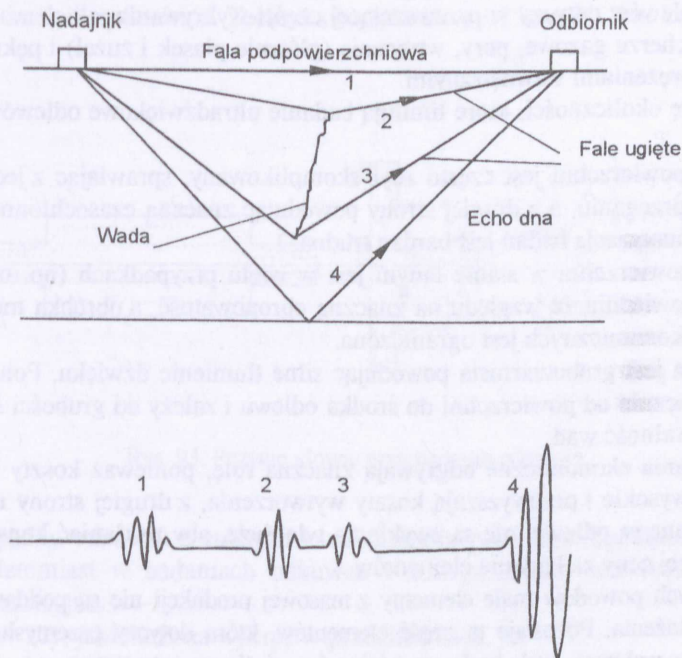


Rys. 91. Schemat ustawienia głowic ultradźwiękowych przy badaniu automatycznym i podział na strefy ich działania

Jedną z metod, która zyskała znacznie szersze możliwości zastosowania w zautomatyzowanych badaniach nieniszczących dzięki wprowadzeniu nowoczesnej techniki komputerowej, jest metoda TOFD (Time-Of-Flight Diffraction). Metoda ta wykorzystuje do oceny rodzaju i położenia wady, oprócz zjawiska odbicia także zjawisko dyfrakcji fal ultradźwiękowych. W czasie badania rejestrowane są impulsy fal ultradźwię-

kowych rozproszone dyfrakcyjnie na krawędziach wady. Zasada przedstawiona została na rys. 92. Podstawę układu pomiarowego stanowią dwie głowice skośne fal podłużnych, ustawione na przeciwko sobie po obu stronach spoiny. Badanie przeprowadzone jest więc metodą przepuszczania. Głowica nadawcza wysyła wiązkę fal ultradźwiękowych obejmującą całą objętość spoiny. Jak widać na rysunku 92, część fali ultradźwiękowej przechodzi bezpośrednio między głowicą nadawczą i odbiorczą jako fala podpowierzchniowa i ze względu na najkrótszą drogę dochodzi do głowicy odbiorczej jako pierwsza i bez zmiany fazy (impuls nr 1, rys. 92).

Dolna część wiązki dociera do głowicy odbiorczej po odbiciu od przeciwległej powierzchni materiału badanego. Odbicie od granicy z ośrodkiem o mniejszej impedancji akustycznej powoduje zmianę fazy – impuls 4.



Rys. 92. Zasada badania metodą TOFD

Oba te impulsy rejestrowane są przez układ niezależnie od występujących wad w materiale. Stanowią one punkty odniesienia, pomiędzy którymi pojawiać się mogą dodatkowe impulsy powstające na skutek oddziaływania fal ultradźwiękowych z wadami w materiale. Przedstawione na rysunku 92 torry impulsów 2 i 3 są wynikiem dyfrakcji na krawędzi wady. Istnieje ważna różnica między impulsami ulegającymi dyfrakcji na dolnej i górnej krawędzi wady. Impulsy ulegające dyfrakcji na dolnej krawędzi nie

zmieniają swojej fazy, zaś impulsy ulegające dyfrakcji na górnej krawędzi zmieniają fazę o 180° . Czasy opóźnienia impulsów rozproszonych dyfrakcyjnie na krawędziach wady stanowią podstawę do dokładnej oceny głębokości i wysokości wady.

Do zalet tej metody należy zaliczyć:

- wysoką wykrywalność wad połączoną z niskim wskaźnikiem fałszywych wskazań,
- możliwość dokładnego pomiaru zarówno długości, jak też głębokości i wysokości wad
- możliwość badania spoin o grubościach od 6 do 300 mm,
- dużą szybkość badania (do 70 m spoiny/godzinę) niezależnie od grubości spoin,
- uniwersalność polegającą na możliwości przeprowadzania badań spoin o różnych średnicach i grubościach za pomocą jednego przenośnego zestawu pomiarowego.

6.2. Odlewy

Badanie odlewów dotyczy w przeważającej części wykrywania takich wad jak jamy skurczowe, pęcherze gazowe, pory, wtrącenia (głównie piasek i żużel) i pęknięcia spowodowane naprężeniami wewnętrznymi.

Istnieje parę okoliczności, które limitują badanie ultradźwiękowe odlewów kształtowych:

1. Kształt powierzchni jest często zbyt skomplikowany, sprawiając z jednej strony kłopoty przy sprzęganiu, a z drugiej strony powodując znaczną czasochłonność, szczególnie, że automatyzacja badań jest bardzo trudna.

2. Jakość powierzchni w stanie lanym jest w wielu przypadkach (np. odlewy piaskowe) nieodpowiednia ze względu na znaczną chropowatość, a obróbka mechaniczna ze względów ekonomicznych jest ograniczona.

3. Struktura jest gruboziarnista powodując silne tłumienie dźwięku. Ponadto zmienia się ona znacznie od powierzchni do środka odlewu i zależy od grubości ścianki. To osłabia wykrywalność wad.

4. Rozważania ekonomiczne odgrywają znaczną rolę, ponieważ koszty badania są czasami zbyt wysokie i przewyższają koszty wytworzenia, z drugiej strony naprężenia, jakim poddawane są odlewy, nie są zwykle na tyle duże, aby nakłaniać konsumenta do płacenia wyższej ceny za badanie elementów.

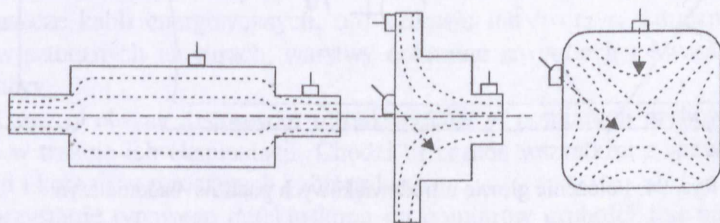
Z powyższych powodów małe elementy z masowej produkcji nie są poddawane takim badaniom z założenia. Pozostaje ta część elementów, która dotyczy przemysłu ciężkiego, a więc: elementy walcerek, wały korbowe, ościeżnice, ciężka armatura rurowa.

Wady podpowierzchniowe zwykle można wykrywać taniej metodami magnetycznymi lub penetracyjnymi. Głównie tylko wewnętrzne defekty w drogich elementach bada się metodami ultradźwiękowymi.

Do badań odlewów stosuje się głowice o niższych częstotliwościach (im niższa częstotliwość tym niższe tłumienie).

6.3. Ciężkie odkuwki

Z powodu wysokich kosztów wytwarzania takich odkuwek jak wirniki generatorów czy turbin, badania przeprowadza się już od początku procesu wytwarzania tych elementów. Badania w przypadku dużych wlewków są dość kontrowersyjne. Przede wszystkim nie zawsze mogą być one penetrowane przez dźwięk. Przy standardowych średnicach głowic wymagana jest częstotliwość przynajmniej 0,5 MHz. W niektórych przypadkach gruboziarnistość struktury można usunąć przez obróbkę cieplną wlewków. Wysokostopowe stale nawet przy małych wlewkach nie wykazują wystarczającej przepuszczalności dźwięku. Dodatkowo przeciw badaniom takich wlewków przemawia fakt, że jamy skurczowe, które nie kontaktują się z atmosferą, a tym samym nie są zbyt mocno utlenione, mogą być zespawane w trakcie obróbki plastycznej. Badania przeprowadza się w kierunku najmniejszych wymiarów, tj. prostopadle do osi, wzdłuż równoległych ścieżek. Kęsy bada się tak często, jak to jest możliwe pomiędzy poszczególnymi operacjami kucia i wyżarzania. Technika badań zależy od kształtu linii kucia – rys. 93.



Rys. 93. Pozycje głowic przy badaniu odkuwek

W przypadku odkuwek o prostych kształtach przeprowadza się najczęściej badania stykowe. Natomiast w badaniach odkuwek o nieregularnych kształtach, przeważają techniki immersyjne.

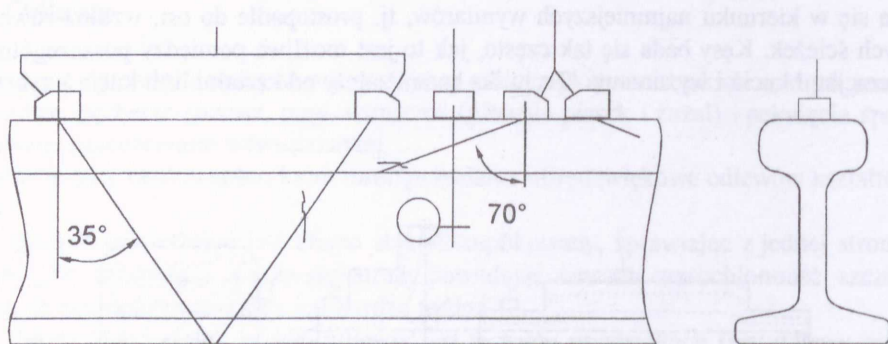
Typowe wady, jakie można wykryć w przedkulkach, to:

1. Pęknięcia płatkowe (wodorowe pęknięcia włoskowate często w połączeniu z segregacją strefową), pęknięcia na skutek segregacji, wtrącenia żużlowe.
2. Wtrącenia niemetaliczne (produkty utleniania takie jak tlenek krzemu, aluminium lub wapnia, żużel z kąpieli metalowej),
3. Pęknięcia powstałe w trakcie kucia (na powierzchni przy kuciu w złej temperaturze), rozerwania (wnęki), pęknięcia na zimno.
4. Wtrącenia obce (wymurówka pieca itp.).

Dalsze badania przeprowadza się w zależności od rodzaju wykonywanego elementu i naprężeń, na jakie jest on narażony w trakcie pracy.

6.4. Tabor kolejowy

Badania ultradźwiękowe znalazły szerokie zastosowanie głównie w badaniu takich elementów taboru kolejowego jak szyny, które podlegają badaniom ultradźwiękowym już na etapie produkcji, a potem w trakcie eksploatacji. Wady szyn można podzielić na: materiałowe (płatki śnieżne, rozwarstwienia itp.) i powstające przy eksploatacji (pęknięcia). Do badań szyn stosowane są głowice czołowe, kątowe jak i podwójne w systemie automatycznym. Główki i stopki szyn bada się głowicami kątowymi (45° , 70°), natomiast szczytki głowicami czołowymi (rozwarstwienia).



Rys. 94. Położenie głowic ultradźwiękowych podczas badania szyn

6.5. Rury i cylindry

Badanie rur bezszwowych i spawanych przeprowadza się dwiema różnymi metodami w zależności od średnicy rury. Rury o średnicy zewnętrznej do 180 mm są transportowane na przenośnikach liniowych przez urządzenie testujące. Badania na podłużne i poprzeczne wady przeprowadza się za pomocą głowic obracających się wokół rury w zbiorniku wodnym. Wady skośne mogą być wykryte na tym etapie, ale przy zmniejszonej prędkości badania. Wprowadzenie dodatkowych głowic umożliwia monitorowanie danych geometrycznych jak: grubość ścianki, średnica zewnętrzna i wewnętrzna, owalność i mimośrodowość rury.

Dla rur o większych średnicach (do ok. 600 mm) jak również dla mniejszych linii produkcyjnych, opracowuje się gniazda badawcze. Mają one za zadanie wspomagać pracę większej ilości głowic do badania podłużnych, poprzecznych i skośnych wad z jednoczesnym pomiarem grubości ścianki.

Urządzenia do badania rur są często wyposażone w najnowsze systemy elektroniczne do komputerowego wspomagania badań, co pozwala użytkownikowi na przechowywanie danych i wprowadzanie różnych parametrów badań,

Dostępne są również na rynku specjalne systemy do pomiarów grubości ścianek w elementach końcowych jak również półproduktach.

6.6. Badanie grubości

Metody ultradźwiękowe znalazły szerokie zastosowanie w pomiarach grubości, zarówno w badaniach ręcznych jak i automatycznych różnych materiałów, w temperaturach niskich i wysokich. Zaletą techniki ultradźwiękowej jest możliwość pomiaru przy dostępie do mierzonego obiektu tylko z jednej strony.

Typowe przykłady wykorzystania ultradźwięków do pomiarów grubości to:

- a) przedstawienie rdzenia w odlewach żeliwnych, np. obudowy pomp, bloków silników, łopatek turbin itp.,
- b) duże odlewy, np. segmentów tuneli, zbiorników kwasoodpornych,
- c) elementy wykonywane techniką wydmuchiwania, jak np. butle, pojemniki ze szkła, tworzyw sztucznych, rury bez szwu z metali lub tworzyw sztucznych,
- d) płaszcze kabli energetycznych, np. z ołowiu lub tworzyw sztucznych, powłoki z tworzyw sztucznych na rurach, warstwy ochronne na butlach z kwasami i lampach o dużej mocy.

Drugi ważny obszar zastosowań ultradźwięków w pomiarach grubości to badania urządzeń w trakcie ich eksploatacji. Chodzi tu przede wszystkim o sprawdzanie skutków erozji i korozji w rurociągach i zbiornikach.

Wykorzystanie typowego defektoskopu do pomiarów grubości jest ograniczone ze względu na niedokładność odczytu. Nowoczesne przyrządy pomiarowe mają ekran z obrazem typu a (rys. 95), co znacznie ułatwia pomiary, dzięki możliwości kontroli echa i jego porównania ze wskazaniem cyfrowym. Ponadto istnieje możliwość dopasowania parametrów badań takich jak np. wzmocnienie i ustawienie bramki do zmieniających warunków pomiaru.

W badaniach grubości wykorzystuje się zjawisko czasu przejścia fali ultradźwiękowej, który jest proporcjonalny do grubości badanego elementu, przy założeniu, że prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w badanym elemencie jest stała. Czas przejścia może być mierzony między dwoma kolejnymi echem dna lub między echem wejścia do badanego elementu a pierwszym echem dna. Głowice stosowane do pomiarów grubości mają małą średnicę przetwornika oraz dużą częstotliwość. W badaniach ręcznych stosuje się zarówno głowice pojedyncze jak i podwójne.

Z powodu małej średnicy wiązki ultradźwiękowej, wszelkie niejednorodności materiału, jak np. żuźle w stali, pęcherze w odlewach aluminiowych i tworzywach sztucznych mogą wytwarzać na tyle duże echa, że odległość od powierzchni do niejednorodności może zostać potraktowana jako grubość badanego elementu. Jednak w takich przypadkach mamy skokową zmianę grubości, co może być sygnałem nieprawidłowej interpretacji. Jeżeli możliwy jest dostęp do drugiej strony elementu, należy sprawdzić,

czy nie występuje zgrubienie na tej ścianie w postaci np. muld, które mogą dawać również podobne efekty. W przypadku braku możliwości sprawdzenia tylnej ścianki, pomoc może przyrząd z obrazem A, umożliwiający dokładną obserwację echa i czasu przejścia przy przesuwaniu głowicy między miejscem o właściwej grubości a obszarem z nieciągłością. Czasami pewniejsze jest wprowadzenie wiązki pod kątem 45° . W przypadku zakłóceń spowodowanych odbiciami od granicy ziaren w materiałach niejednorodnych i gruboziarnistych (struktura austenityczna, mosiądże) nie wolno stosować głowic podwójnych, lecz wyłącznie jednoprzetwornikowe o dużej średnicy wiązki ultradźwiękowej. Uzyskamy w ten sposób większą różnicę amplitud między echem dna a echemi zakłócającymi. Zaleca się głowice o niskiej częstotliwości 1 lub 2 MHz, a w szczególnych przypadkach nawet niższej. Aby uzyskać odpowiednią rozdzielczość w pobliżu głowicy, stosuje się specjalne odcinki dobiegowe.



Rys. 95. Grubościomierz DMS firmy Krautkrämer z wyświetlaczem

Jeżeli powierzchnia badanego elementu jest wypukła, to głowica styka się z powierzchnią tego elementu tylko liniowo lub punktowo, powodując poszerzenie się echa wejścia w materiał oraz powstawanie ech zakłócających, które przez interferencję mogą zmieniać, a nawet zakrywać echo dna. W tym przypadku należy stosować głowice o stosunkowo małej średnicy powierzchni przyłożenia.

Przy nierównoległości powierzchni zewnętrznej lub wewnętrznej (obszary o dużym zakrzywieniu w elementach głęboko tłoczonych, gdzie może wystąpić pocienienie, łopatki turbin) stosuje się tzw. głowice olówkowe, które sprzęga się w taki sposób, że powierzchnia wewnętrzna jest prawie prostopadła do kierunku wiązki ultradźwiękowej.

Jeżeli powierzchnia badanego obiektu jest wklęsła, to należy stosować małe głowice podwójne, które można dopasować do krzywizny przez odpowiednie podszlifowanie.

Przy średnicach otworów poniżej ok. 12 mm konieczne są głowice specjalne.

Wszelkie szczeliny (małe przy powierzchniach gładkich, duże przy powierzchniach chropowatych), które występują pomiędzy głowicą a badanym elementem należy wypełnić. Jeżeli badana powierzchnia jest dodatkowo pokryta warstwą farby lub tworzywa sztucznego, to odległość między głowicą a badanym elementem jest jeszcze większa. Może to całkowicie fałszować wyniki w przypadku wykorzystywania do pomiaru echa wejścia. W takiej sytuacji o ile stan badanego obiektu umożliwia uzyskanie ech wielokrotnych, należy dokonywać pomiarów pomiędzy kolejnymi echemi dna.

Aby uzyskać możliwie najcieńszą warstwę sprzęgającą, zaleca się stosowanie środków sprzęgających o jak najmniejszej lepkości (np. woda, gliceryna itp.)

Prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w badanym elemencie ma również istotne znaczenie. Uważa się ją za wielkość stałą, ale jest to uproszczenie dopuszczalne w pewnych granicach. Aby zminimalizować jej wpływ, zaleca się kalibrację przyrządu na badanym elemencie w takim miejscu, gdzie możliwy jest porównawczy pomiar metodami mechanicznymi. Przy stosowaniu do kalibracji wzorców, należy pamiętać, że muszą być one nie tylko wykonane z tego samego materiału, ale również poddane takiej samej obróbce jak badany element.

6.7. Badania właściwości materiałowych

Oprócz typowego zastosowania do wykrywania nieciągłości w materiale, badania ultradźwiękowe mogą być wykorzystywane do oceny takich własności materiału jak: twardość, własności wytrzymałościowe oraz do pomiaru naprężeń.

Ocena własności materiałów generalnie opiera się na pomiarze współczynnika tłumienia lub prędkości rozchodzenia się fal.

Wykorzystując korelację między współczynnikiem tłumienia a daną własnością materiału, można dokonać pomiarów takich własności jak: odporność na pękanie czy ocena zmian zmęczeniowych i przy pełzaniu. Natomiast na podstawie zmiany w prędkości rozchodzenia się fali w materiale można dokonać oceny takich własności jak: anizotropia (np. ocena tekstury, żywic zbrojonych włóknami), stałych sprężystości, własności wytrzymałościowych (ocena własności wytrzymałościowych betonu, żeliwa, materiałów ceramicznych) oraz pomiarów naprężeń. Szeroko wykorzystywana jest również zależność między prędkością rozchodzenia się fal podłużnych i poprzecznych a twardością. Wykorzystywana jest ona szeroko w twardościomierzach ultradźwiękowych (np. MIC 10 firmy Krautkrämer).



LITERATURA

- [1] Krautkrämer J., Krautkrämer H.: *Ultrasonic Testing of Materials*. 4th edition. Berlin-Heidelberg-New York Springer-Verlag 1990.
- [2] Senczyk D.: *Metody badania materiałów*. Politechnika Poznańska, Poznań 1994.
- [3] Śliwowski M., Mackiewicz S., Zbyszewski A.: *Zautomatyzowana kontrola ultradźwiękowa spoin obwodowych rurociągów*. W: Mat. Seminarium nt.: Ultradźwiękowe badania materiałów. Zakopane 07-09 maj 1997.
- [4] Deputat J.: *Dyfrakcja fal ultradźwiękowych na szczelinie*. W: Mat. Seminarium nt.: Ultradźwiękowe badania materiałów. Zakopane 07-09 maja 1997.
- [5] Frielinghaus R.: *Problemy związane z pomiarami grubości metodą ultradźwiękową*. W: Mat. Seminarium nt.: Ultradźwiękowe badania materiałów. Zakopane 07-09 maja 1997.
- [6] Śliwiński A.: *Ultradźwięki i ich zastosowanie*. WNT, Warszawa 1993.
- [7] Jawor R., Marchnicki M., Niezborala J., Okrój R.: *Ultradźwiękowe badania morskich konstrukcji spawanych*. Mat. Szkoleniowe. Gdańsk 1988.
- [8] Rojek B., Gołabek P., Korneta A.: *Laboratorium z podstaw badań ultradźwiękowych*. Ustroń 1995.
- [9] *Nondestructive Evaluation and Quality Control*. Metals Park OH 44073, Metals Handbook Vol. 17, 1989.
- [10] *Ultrasonic Testing. Level I and II*. Krautkrämer GmbH (materiały szkoleniowe).
- [11] Obraz J.: *Ultradźwięki w technice pomiarowej*. WNT, Warszawa 1983.
- [12] *Ultradźwiękowa diagnostyka połączeń ciernych*. Red. Roman Calikowski. PWN, Warszawa 1989.
- [13] *Novel techniques of non-destructive examination*: Proc. of a Royal Soc. Discussion Meeting. London 9-10 July 1985. London RS 1986. VI, s. 218.
- [14] Goebbels K.: *Ultrasonic for microcrystalline structure examination*. The Royal Society 1986, Proceedings of a Royal Society Discussion Meeting, 9-10 July 1985.
- [15] Gagnepain J.J.: *Acoustic resonance techniques for temperature, stress and impurity characterization in piezoelectric materials*. The Royal Society 1986, Proceedings of a Royal Society Discussion Meeting, 9-10 July 1985.
- [16] Sayers C.M. i inni: *Texture and stress determination in metals by mine ultrasonic Raleigh waves and diffraction*. The Royal Society 1986, Proceedings of a Royal Society Discussion Meeting, 9-10 July 1985.
- [17] Thompson R.B., Gray T.A.: *Use of ultrasonic models as tools in the design and validation of new NDE techniques*. The Royal Society 1986, Proceedings of a Royal Society Discussion Meeting, 9-10 July 1985.

- [18] Waaley H.N.G., Norton G.J.: *Ultrasonic measurement of internal temperature distribution*. The Royal Society 1986, Proceedings of a Royal Society Discussion Meeting, 9-10 July 1985.
- [19] Pawłowski Z.: *Badania nieniszczące*. Poradnik. SIMP, Warszawa 1988.
- [20] Pawłowski Z., Pawłowski B.: *Orientacja i położenie reflektorów fal ultradźwiękowych wykrywanych głowicami skośnymi w układzie tandem*. W: Mat. XVI Krajowej Konf. Badań Nieniszczących, Szczecin 15-17 września 1987. Politechnika Szczecińska Szczecin 1987.
- [21] Filus Z.: *Bezstykowy ultradźwiękowy pomiar grubości wyrobów metalowych*. W: Mat. XXIV Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Poznań 24-26.10.1995. Poznań 1995. s. 39.
- [22] Rojek B., Gołabek P., Korneta A.: *Defektoskop ultradźwiękowy z przetwarzaniem cyfrowym pracujący w środowisku IBM PC*. W: Mat. Konf. XXIV Krajowej Konf. Badań Nieniszczących, Poznań 24-26 października 1995. Poznań 1995. s. 143.
- [23] Ciesielski M., Dorn E., Krysztofik J., Szachnowski W.: *Ultradźwiękowe monitorowanie procesu niszczenia*. W: Mat. Konf. XXIV Krajowej Konf. Badań Nieniszczących, Poznań 24-26 października 1995. Poznań 1995. s. 215.
- [24] Pęski Z.: *Uwagi na temat projektowania i własności głowic ultradźwiękowych*. W: Mat. Konf. 25 KKBN, Warszawa październik 1996. Warszawa 1996. (Zeszyty Problemowe). s. 113.
- [25] Pawłowski Z., Gutkiewicz P.: *System komputerowego wspomaganie w ultradźwiękowej diagnostyce stanu materiału*. W: Mat. 23 KKBN, Szczyrk 15-17 listopada 1994. s. 7.
- [26] Orłowicz W., Opiekun Z., Gedeonowa Z., Tresa D.: *Wpływ warunków ulepszania cieplnego żeliwa sferoidalnego na wartości wskaźnika kontroli ultradźwiękowej*. W: Mat. 23 KKBN, Szczyrk 15-17 listopada 1994. s. 89.
- [27] Piekarczyk J.: *Wpływ porowatości na zmianę prędkości fal powierzchniowych i stałych materiałowych w Al_2O_3* . W: Mat. 23 KKBN, Szczyrk 15-17 listopada 1994. s. 101.
- [28] Hupalo T., Michnowski W., Paszuk R.: *Technika cyfrowa w ultradźwiękowym badaniu materiałów*. W: Mat. 23 KKBN, Szczyrk 15-17 listopada 1994. s. 271.
- [29] Mackiewicz S.: *Skomuteryzowana metoda TOFD – nowe podejście do ultradźwiękowych badań spoin.* W: Mat. Seminarium nt.: Ultradźwiękowe badania materiałów. Zakopane 07-09 maja 1997.

PN-76/M-70008 Badania nieniszczące. Ogólne nazwy i określenia

PN-76/M-70050 Badania nieniszczące. Metody ultradźwiękowe. Nazwy i określenia

PN-75/M-70051 Badania nieniszczące metodami ultradźwiękowymi. Wzorzec kontrolny W1

PN-74/M-70052 Badania nieniszczące. Metody penetracyjne. Nazwy i określenia

PN-74/M-70053 Badania nieniszczące Badanie szczelności. Nazwy i określenia

PN-75/M-69703 Spawalnictwo. Wady złączy spawanych. Nazwy i określenia.

PN-75/M-70054 Badania nieniszczące metodami ultradźwiękowymi Wzorzec kontrolny W2

PN-77/M-70056 Badania nieniszczące metodami ultradźwiękowymi. Wzorce mikrosekundowe

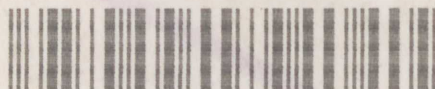
PN-85/M-69775 Spawalnictwo. Wadliwość złączy spawanych. Oznaczanie klasy wadliwości na podstawie oględzin zewnętrznych

PN-89/M-70055 Spawalnictwo. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych

PN-89/M-69777 Klasyfikacja wadliwości złączy spawanych na podstawie wyników ultradźwiękowych

19, -

Biblioteka Główna
Politechniki Szczecińskiej
W. 127160



012-127160-00-0

