

POLITECHNIKA LUBELSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA INŻYNIERII
MATERIAŁOWEJ

Laboratorium
Inżynierii
Materiałowej

23. BADANIA DEFEKTOSKOPOWE NIENISZCZĄCE

23.1. Wprowadzenie

W elementach maszyn i urządzeń mogą występować wady ukryte lub bardzo trudno dostrzegalne, które mogą być przyczyną poważnych awarii. Wady te są najczęściej pochodzenia technologicznego lub też powstają w czasie eksploatacji. Do najbardziej charakterystycznych wad pochodzenia technologicznego należą: pęknięcia i porowatości odlewnicze, zakucia, zawałowania, rysy i wgłębienia powstające podczas ciągnięcia lub tłoczenia, pęknięcia i zażużenia spoin, pęknięcia powstałe w czasie obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej oraz pęknięcia szlifierskie. Wady eksploatacyjne to przede wszystkim pęknięcia zmęczeniowe i korozja punktowa lub powierzchniowa.

Dla zapewnienia wysokiej jakości i niezawodności maszyn i urządzeń musimy posługiwać się takimi metodami kontroli, które ujawniają ukryte wady bez zniszczenia badanego obiektu. Najczęściej stosowanymi metodami badań nieniszczących są metody:

- radiologiczne (radiografia przemysłowa),
- ultradźwiękowe (defektoskopia ultradźwiękowa),
- magnetyczne (defektoskopia magnetyczna),
- wnikania substancji (defektoskopia penetracyjna),
- prądów wirowych.

Metody te umożliwiają prowadzenie badań na różnych etapach procesu produkcji, od kontroli materiałów począwszy, poprzez kontrole międzyoperacyjne aż do kontroli odbiorczej gotowych wyrobów lub przy ocenie zachowania się ich podczas eksploatacji. Należy przy tym wyraźnie podkreślić, że żadna z wymienionych wyżej metod nie jest uniwersalna i każda ma swoje zalety i ograniczenia.

23.2. Badania radiologiczne

Radiografia przemysłowa obejmuje zbiór metod kontroli jakości, które umożliwiają wykrycie wad materiałów i wyrobów przy pomocy promieniowania jonizującego. W badaniach tych wykorzystuje się zjawisko osłabienia promieniowania przechodzącego przez badany materiał, a własności jonizujące umożliwiają rejestrację wyników kontroli. Z wielu rodzajów promieniowania jonizującego zastosowanie w radiografii znalazło

promieniowanie rentgenowskie, zwane również promieniami X, promieniowanie gamma pochodzące najczęściej z rozpadu sztucznego izotopu kobaltu Co^{60} lub irydu Ir^{192} oraz neutrony otrzymywane w specjalnych urządzeniach zwanych betatronami.

23.2.1. Przechodzenie promieniowania rentgenowskiego i γ przez materię

Promieniowanie rentgenowskie i γ to dwie postacie promieniowania elektromagnetycznego, różniące się tylko miejscem powstania. Promieniowanie γ pochodzi z jądra atomowego natomiast promieniowanie rentgenowskie – z powłok elektronowych. Promieniowania te podlegają wobec tego podczas wzajemnego oddziaływania z materią tym samym zjawiskom.

Ośłabienie towarzyszące przechodzeniu promieniowania rentgenowskiego i γ przez materię występuje na skutek trzech zjawisk fizycznych:

- pochłaniania fotoelektrycznego (fotoefekt),
- rozpraszania (efekt Comptona),
- tworzenia par negaton – pozyton (efekt tworzenia się par).

W związku z tym liniowy współczynnik osłabienia μ przedstawia sobą sumę trzech współczynników charakteryzujących poszczególne efekty

$$\mu = \tau + \sigma + \chi \quad (23.1.)$$

Zmniejszenie natężenia promieniowania przy przejściu przez materię jest tym większe, im większa jest:

- długość fali promieniowania,
- grubość prześwietlanego przedmiotu,
- gęstość prześwietlanego materiału,
- liczba atomowa Z prześwietlanej substancji.

23.2.2. Zasady kontroli radiologicznej

Radiografia jest metodą otrzymywania obrazu przedmiotu prześwietlanego promieniowaniem jonizującym. Źródło promieniowania umieszcza się z jednej strony badanego przedmiotu, a z drugiej strony detektor promieniowania. Obraz obiektu otrzymany przez prześwietlenie promieniami X lub γ nazywa się rentgenogramem lub radiogramem. Jest to wynik "przezroczystości" kontrolowanego wyrobu. Dlatego też na podstawie radiogramu można ujawnić zmianę gęstości (wadę) badanego materiału lub różnice grubości.

Spotykane w praktyce wady w wyrobach mają w większości przypadków charakter pustek (pęcherze, pęknięcia, przyklejenia w spoinach i połączeniach lutowanych). Na

radiogramach wady te ujawniają się w postaci plam (pęcherze i pory), linii krzywych (pęknięcia) lub smug (przyklejenia).

Jeżeli np.: na płytę stalową o grubości D , w której znajduje się pęcherz o wymiarze d , jak to przedstawia rys. 23.1., pada wiązka promieni X lub γ o intensywności I_0 , to przy przejściu przez warstwę D promienie te ulegną osłabieniu i wiązka wychodząca będzie miała intensywność I_B . Natomiast w miejscu, gdzie znajdzie się pęcherz, promienie przechodzą przez warstwę metalu o grubości $(D - d)$ mm, a zatem osłabienie ich będzie mniejsze i wiązka wyjściowa w tym miejscu będzie miała intensywność I_A , przy czym

$$I_B = I_0 e^{-\mu D} \quad (23.2.)$$

$$I_A = I_0 e^{-\mu (D-d)} \quad (23.3.)$$

a zatem

$$I_A > I_B$$

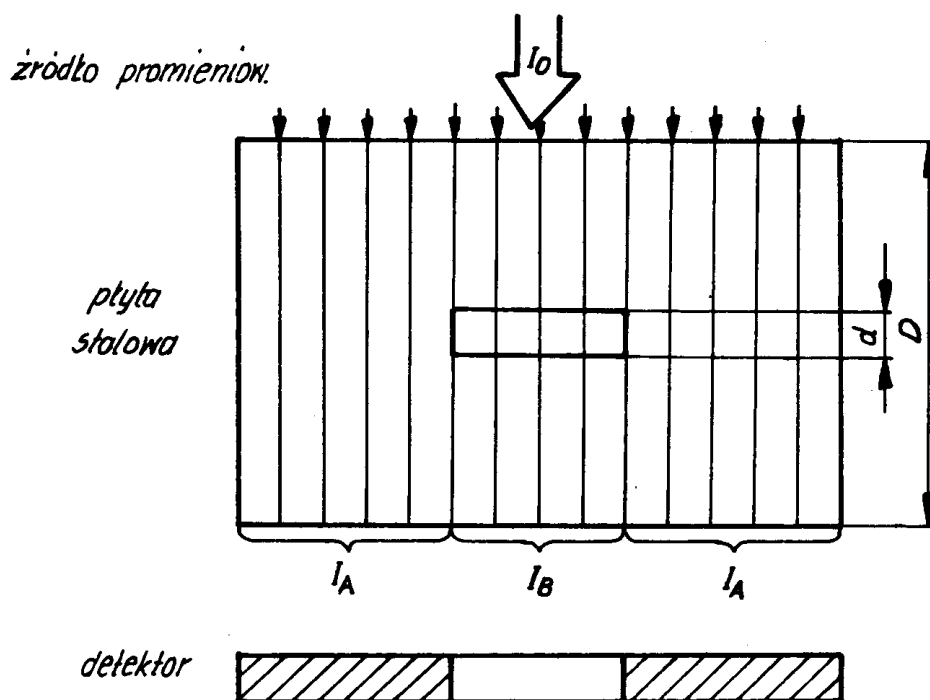
gdzie:

D – grubość materiału,

d – grubość pęcherza,

μ – współczynnik osłabienia

Na radiogramie będzie widoczna zmiana intensywności promieniowania w miejscu występowania pęcherzy.



Rys. 23.1. Zasada kontroli radiologicznej

Wykrywalność wad jest ilościową charakterystyką danej metody kontroli i określa jej przydatność do wykrycia wad rzeczywistych (wad spawania, lutowania, odlewania i pozostałych powstałych w innych procesach technologicznych). Jeżeli przy badaniach radiologicznych wady nie zostaną ujawnione, to nie oznacza to z całą pewnością, że w obiekcie badanym nie ma żadnych wad. Np.: wada może znajdować się w takim miejscu, że przy wybranej technice kontroli nie można jej wykryć. Nie zostaną również wykryte niewielkie wady, jeżeli czułość metody będzie niewystarczająca do jej ujawnienia.

23.2.3. Metody radiografii przemysłowej

Podstawą podziału metod wykrywania wad jest sposób pomiaru natężenia promieniowania za badanym wyrobem. Jeżeli za prześwietlonym wyrobem znajduje się ekran fluorujący to otrzymuje się na nim cieniowy obraz kontrolowanej części, a wady wewnętrzne ujawniają się na nim w postaci jaśniejszych punktów na ciemniejszym tle. Stosowanie ekranów i elektronowych wzmacniaczy obrazów rentgenowskich grupuje te metody do grupy zwanej fluoroskopia.

W przypadku użycia błony rentgenowskiej otrzymuje się negatywowy, cieniowy obraz wyrobu z ciemniejszymi plamami w miejscach zalegania wad wewnętrznych. Stopień zaczernienia błony rentgenowskiej po jej obróbce fotochemicznej (wywołaniu i utrwaleniu) jest proporcjonalny do dawki ekspozycyjnej, której wielkość zależy od grubości, gęstości i jednorodności materiału osłabiającego promieniowanie. Jest to grupa metod kontroli zwana metodami radiograficznymi.

Stosuje się również metody radiometryczne i kseroradiograficzne. Radiometryczna metoda kontroli wyrobów polega na pomiarze natężenia promieniowania za pomocą liczników i komór jonizacyjnych. W przypadku metody kseroradiograficznej promieniowanie rejestrowane jest na płytach pokrytych materiałem półprzewodzącym np. selenem.

23.2.4. Aparaty rentgenowskie

Do kontroli materiałów, części i wyrobów stosuje się szeroko aparaty rentgenowskie o napięciu 10–400 kV, ale stosowanie nowych materiałów i konstrukcji powoduje ciągłe rozszerzanie tego zakresu napięć.

Przemysłowe aparaty rentgenowskie nie są w Polsce produkowane. Najczęściej spotykane aparaty importowane pochodzą: z RFN – firma Müller – Röntgenwerk (aparaty MG, Macrotank) firma Seifert – Röntgenwerk (aparaty IsoVolt), z Belgii – firma Balteau (aparaty Baltospot i Baltograph), z Danii – firma Picker – Andrex X-Ray (aparaty Andrex), z Węgier – Zakłady Medicar (aparaty Liliput i Rollix), z ZSRR aparaty typu RUP i Mira. Schemat ideowy prostego aparatu rentgenowskiego Liliput 120 przedstawia rys. 23.2.

Napięcie zasilające z sieci 110, 190, 220 lub 380 V przez bezpieczniki B_1 i B_2 oraz wyłącznik sieciowy WS wchodzi na autotransformator AT. Ponieważ napięcie z sieci może różnić się od napięcia nominalnego, dla jego wyrównania w obwód autotransformatora włączony jest skokowy regulator napięcia RN. Miernik korekcji prądowej MRN ustawia się regulatorem napięcia w pozycji 100%. Załączenie w pozycję W przełącznika skokowego 5 powoduje zadziałanie stycznika 8 i uruchomienie silnika cyrkulacji oleju 4 chłodzącego lampę rentgenowską 1. Kolejne przełączenie przełącznika 5 w pozycję Ż powoduje żarzenie włókna katody lampy. Prąd lampy reguluje się za pomocą regulatora żarzenia 9. Ustawienie przełącznika 5 w pozycję V powoduje włączenie wysokiego napięcia na lampę rentgenowską przez transformator 3. Napięcie lampy dobiera się za pomocą regulatora wysokiego napięcia RWN. Równocześnie z pojawieniem się promieniowania rentgenowskiego uruchamia się zegar ekspozycyjny i jego wyłączenie następuje automatycznie po minięciu ustalonego czasu na wyłączniku czasowym, powodując równocześnie rozwarcie styków stycznika S – poz. 8. Wyłączając wysokie napięcie na lampie rentgenowskiej.

23.2.5. Defektoskopy izotopowe

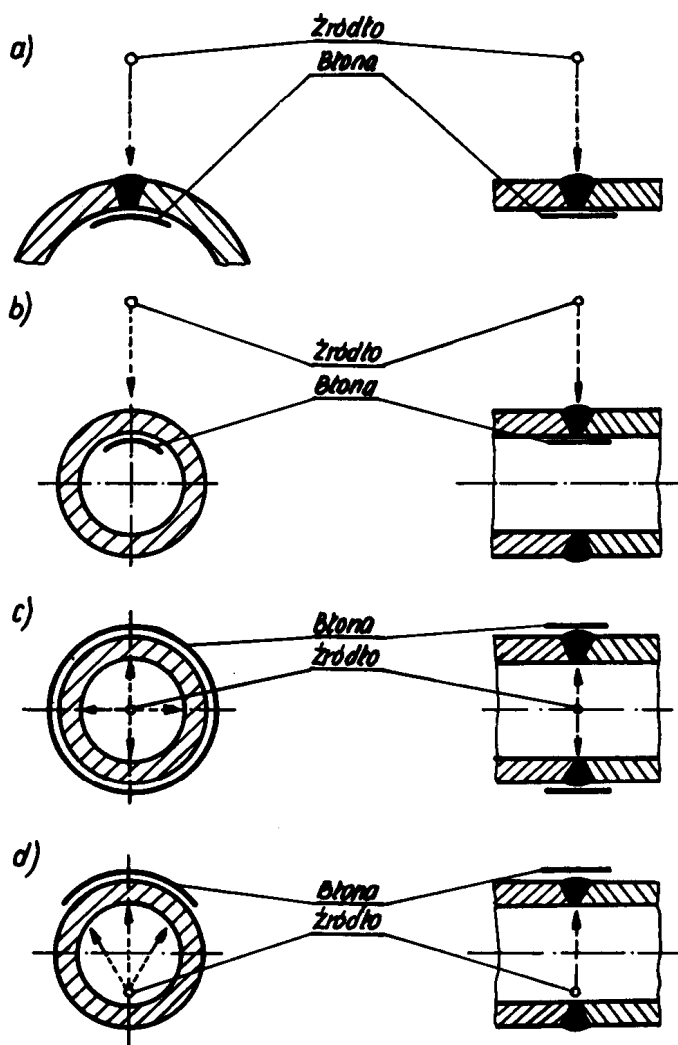
Aparaty gammagraficzne zaopatrzone są w izotopowe źródło promieniowania γ . W kraju ich producentem są Zjednoczone Zakłady Urządzeń Jądrowych "POLON". Defektoskopy te wyposażone są w takie źródła jak: Co^{60} oraz Ir^{192} . Są to defektoskopy uniwersalne i specjalne, zaspokajające praktycznie wszystkie potrzeby.

Przykładem defektoskopów uniwersalnych są defektoskopy krajowe o nazwie "Dingo", "Mamut", "IP-25" i "Żuraw". Defektoskopy specjalne przeznaczone są do kontroli określonych wyrobów, np. spoin obwodowych w rurociągach – defektoskop "Rurowy" i "Pająk", a do kontroli grubościennych walczaków i odlewów defektoskop "Aligator".

23.2.6. Wymagania, metodyka i technika kontroli radiologicznej na przykładzie doczołowych złączy spawanych

Wynikiem kontroli radiograficznej jest ocena jakości badanego wyrobu, co w przypadku złączy spawanych oznacza określenie ich klasy jakości. Wymaganą klasę jakości określają warunki techniczne odbioru. Jeżeli w rezultacie badania radiograficznego wykryte zostaną wady, które kwalifikują spoinę do niższej klasy jakości niż określona w warunkach odbioru, spoinę należy uznać za wadliwą. Radiogram stanowiący podstawę tej oceny musi spełniać odpowiednie wymagania. Wytyczne dla radiogramów spoin czołowych w złączach stalowych określa norma PN-72/M-69770. Wymagania te determinują więc wybór techniki badania, rodzaj błony rentgenowskiej, zastosowanie okładek wzmacniających, dobór warunków ekspozycji i odpowiednią obróbkę fotochemiczną naświetlonych błon.

Przewidziana do kontroli spoina powinna być przed badaniem poprzedzona oględzinami zewnętrznymi. Należy przygotować znakowanie kaset z błonami rentgenowskimi, by można było zidentyfikować badane złącze. Stosuje się tu odpowiednie symbole liczbowe i literowe z ołowiu. Do badania spoin stosuje się aparaty rentgenowskie z lampami o małym ognisku o napięciu do 400 kV.



Rys. 23.3. Metody badania przez jedną ściankę: a/ metoda podstawowa, b/ metoda zewnętrzna, c/ metoda centryczna, d/ metoda ekscentryczna

W Polsce stosuje się błony produkowane przez różne firmy: Foton, Orwo, Agfa-Geveert, Kodak, Industrial. Klasyfikację tych błon wg wyżej wymienionych typów zamieszczono w tablicy 23.1.

Wybór metodyki badań. Norma PN-72/M-69770 określa dwie grupy metod: przez jedną ściankę i przez dwie ścianki. W metodach badania przez jedną ściankę wyróżnia się: metodę podstawową, zewnętrzną, centryczną i ekscentryczną. W metodach badania przez dwie ścianki wyróżnia się: metodę podstawową przesłoniętą, obwodową, półeliptyczną i eliptyczną.

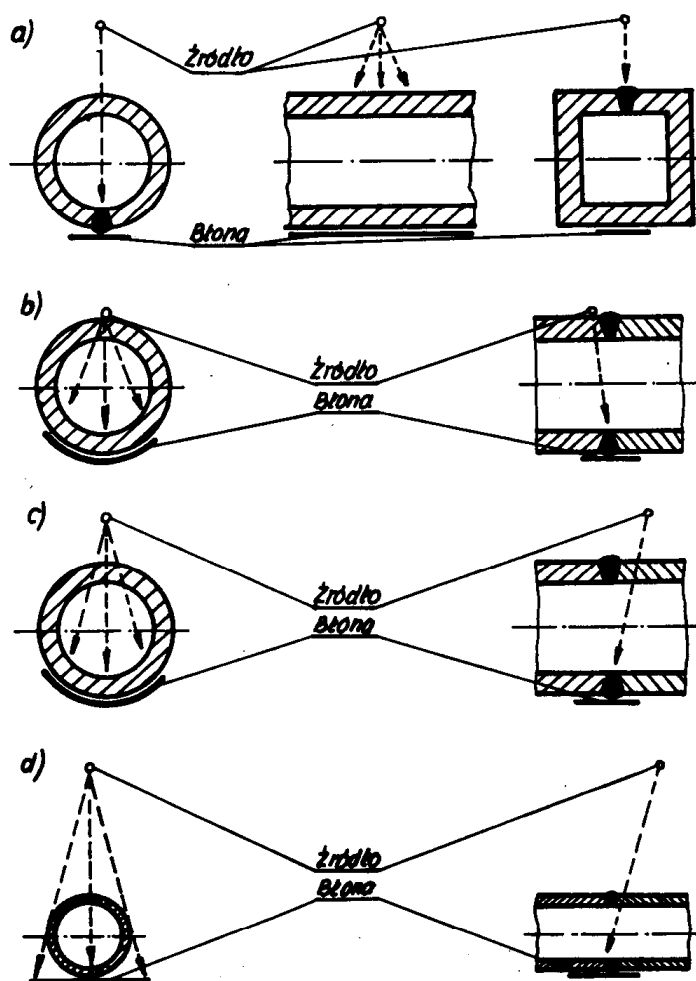
Błony i okładki wzmacniające. Błony radiograficzne w zależności od czułości, kontrastowości, ziarnistości i przeznaczenia dzieli się na cztery typy:

- I – błony o małej czułości, bardzo dużej kontrastowości i bardzo małej ziarnistości,
- II – błony o średniej czułości, dużej kontrastowości i małej ziarnistości,
- III – błony o dużej czułości, średniej kontrastowości i dużym ziarnie,
- IV – błony o bardzo dużej czułości, i bardzo dużej kontrastowości.

Tablica 23.1.

Typ błony	Foton	Orwo	Agfa-Geevert	Kodak	Industrial
I	Defektofilm	–	D2	Microtex	F
II	–	RF-TF-10	D5 D7 D8	Crystallex	Cx
III	–	RF-TF-13 RF-TF-14	D10	Industrex	B
IV	Super R	RF-TF-2	Structurix	Kodirex	G i A

W celu zapewnienia lepszej wykrywalności wad i skrócenia czasu ekspozycji stosuje się w badaniach radiograficznych okładki wzmacniające: metalowe lub fluoryzujące. Okładki metalowe są w postaci folii ołowianych, cynowych lub cynowo-ołowianych. Własności wzmacniające są wynikiem wybijania przez promieniowanie jonizujące fotoelektronów i elektronów odrzutu (zjawisko Comptona). Okładki ołowiane pochłaniają ponadto część promieniowania rozproszonego, co powoduje zwiększenie kontrastu radiogramów. Własności wzmacniające okładek fluoryzujących są wynikiem działania na błonę światła emitowanego przez luminofor (CaWO_4 , ZnS , CdS) pod wpływem nasświetlania promieniowaniem X lub γ . Warstwa fluoryzująca naniesiona jest na karton. Najczęściej spotykanymi okładkami fluoryzującymi są okładki typu Perlux.



Rys. 23.4. Metody badania przez dwie ścianki: a/ metoda podstawowa przesłonięta, b/ metoda obwodowa, c/ metoda półeliptyczna, d/ metoda eliptyczna

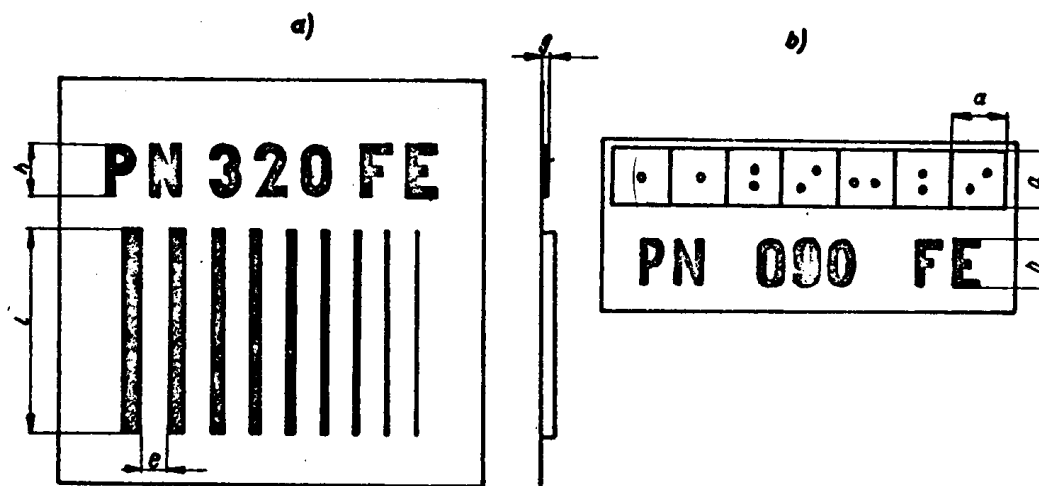
Do pierwszych trzech typów błon I, II i III można stosować okładki metalowe, a do IV typu okładki fluoryzujące.

– Jakość obrazu radiograficznego.

Polskie normy określają trzy klasy jakości obrazu:

- 1 – klasę podwyższonej wykrywalności,
- 2 – klasę normalnej wykrywalności,
- 3 – klasę obniżonej wykrywalności,

O zakwalifikowaniu radiogramu do określonej klasy decydują zastosowane wskaźniki jakości obrazu. Wg PN-77/M-70001 stosować można wskaźniki pręcikowe lub schodkowo-otwarkowe.



Rys. 23.5. Wskaźniki jakości obrazu radiograficznego: a/ wskaźnik pręcikowy, b/ wskaźnik schodkowo-otwarkowy

Wskaźnik pręcikowy (rys. 23.5.a) jest szeregiem pręcików o różnych średnicach, ułożonych równoległe obok siebie. Wzorec schodkowo-otwarkowy (rys. 23.5.b) jest zbiorem ośmiu lub dziewięciu ułożonych obok siebie płaskich płytek o określonych grubościach. Płytki o grubości 0,80 mm i grubsze mają jeden, a cieńsze dwa cylindryczne otworki o średnicach równych grubości płytki. Każdy wskaźnik jest oznakowany jednoznacznie. Np. PN 090 Fe oznacza: PN – znak Polskich Norm, 090 – cyfry oznaczające wielkość największego pierwszego wskaźnika, określające szereg ciągu, Fe – materiał pręcików lub płytek. Ostatni widoczny pręcik lub otworek na radiogramie określa nam granicę wykrywalności wad oraz umożliwia ocenę jakości obrazu dla określonej grubości materiału spawanego.

– Dobór warunków ekspozycji.

Spośród czynników wpływających na jakość radiogramu najważniejszy jest dobór czasu naświetlania i długości fal promieniowania, zależnych od napięcia lampy rentgenowskiej. Do ustalenia optymalnego napięcia i czasu naświetlania w zależności od grubości prześwietlanego materiału służą specjalnie układane tablice i nomogramy. Przykładowe dane

przedstawia tablica 23.2., przy założeniu stałej ogniskowej, stałego natężenia prądu płynącego przez lampę oraz zastosowaniu okładek wzmacniających z folii ołowiowej 0,1 mm. Każdy aparat rentgenowski ma swoje tablice i nomogramy, nie mniej ustalenie optymalnych warunków badań wymaga przeprowadzenia wielu prób.

Tablica 23.2.

Napięcia i czasy ekspozycji (minuty) w zależności od grubości badanej płyty stalowej dla aparatu Liliput 120

kV	Grubość płyty stalowej d [mm]														
	4	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
80	7,0														
100		0,6	4,0												
120				0,4	1,2	6,0									
140							0,7	4,0							
160								0,4	1,0	3,0	7,0				
180										0,5	1,4	3,5	7,0		
200											0,5	1,2	3,0	6,0	10

Mając ustalone warunki ekspozycji, przygotowany przedmiot badań, wybrane błony rentgenowskie i okładki wzmacniające załadowane do elastycznych kaset z tworzyw sztucznych oraz określoną metodę kontroli i zapewnione bezpieczne warunki pracy przystępuje się do kontroli radiologicznej. Po ekspozycji należy wykonać fotochemiczną obróbkę błon. Każda z firm produkujących błony radiograficzne zaleca do ich wywoływania użycia wywoływaczy o określonym składzie. Po utrwaleniu, wypłukaniu i wysuszeniu radiogramu można przystąpić do interpretacji i oceny jakości złącza spawanego.

23.2.7. Interpretacja radiogramów i ocena jakości złącza spawanego

Celem interpretacji jest określenie rodzaju, wielkości i nasilenia wad wewnętrznych widocznych na radiogramie. Interpretacja radiogramów złączy spawanych powinna być przeprowadzona w oparciu o normy PN-74/M-69771 i PN-74/M-69772. Norma PN-74/M-69771 określa wady spoin wykrywane radiograficznie i dzieli je następująco:

A – pęcherze: Aa – pęcherze kuliste, Ab – pęcherze kanalikowe, Ac – fałcuch pęcherzy, Ad – gniazdo pęcherzy, Ae – pęcherze podłużne,

- B – żuźle: Ba – żuźel zwarty, Bb – żuźel pasmowy, Bc – wtrącenia obcego metalu,
- C – przyklejenia: Ca – brzegowe, Cb – międzywarstwowe,
- D – niewłaściwy przetop: Da – wklęsnięcie grani, Db – brak przetopu,
- E – pęknięcia: Ea – podłużne, Eb – poprzeczne, Ec – promieniowe,
- F – wady powierzchni: Fa – wyciek, Fb – nierówność lica, Fc – podtopienie lica, Fd – podtopienie grani.

Przedmiotem normy PN-74/M-69772 jest klasyfikacja wadliwości spawanych złączy doczołowych w zależności od rodzaju, wielkości i nasilenia wad widocznych na radiogramach. Wymiar charakterystyczny wady X oraz względna wielkość wady W pozwala określić stopień wielkości wady

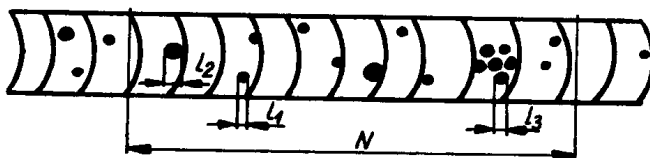
$$W = \frac{X}{t} 100\% \quad (23.4.)$$

gdzie: t – grubość złącza, mm

Norma ustala pięć stopni wielkości wad i oznacza je cyframi od 1 do 5. Nasilenie wad n określane jest przez sumę długości wad danego rodzaju i stopnia wielkości L na odcinku normalnym radiogramu N

$$n = \frac{L}{N} 100\% \quad (23.5.)$$

Przez sumę długości L danych wad należy rozumieć sumę długości obrazów tych wad na odcinku normalnym radiogramu ($L = l_1 + l_2 + l_3 + \dots$) np. na rysunku 23.6.:



Rys. 23.6. Określanie sumy długości pęcherzy

- dla pęcherzy Aa o stopniu wielkości 1 $L = 8l_1$
- dla pęcherzy Aa o stopniu wielkości 3 $L = 2l_2$
- dla gniazda pęcherzy Ad o stopniu wielkości 2 $L = 6l_3$

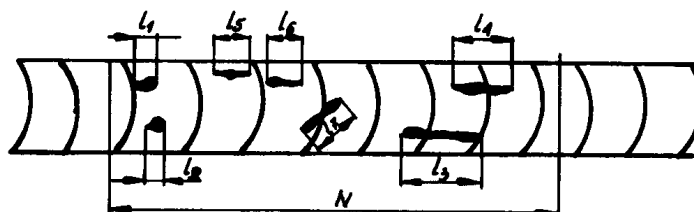
np. dla żuźli na rys. 23.7.:

- dla żuźli Ba o stopniu wielkości 3

$$L = l_1 + l_2$$

- dla żuźli pasmowych Bb o stopniu wielkości 2

$$L = l_3 + l_4$$



Rys. 23.7. Określanie sumy długości żuźli

– dla żużli pasmowych Bb o stopniu wielkości 1 $L = I_5 + I_6 + I_7$

Norma ustala również pięć stopni nasilenia wad oznaczając je cyframi od 1 do 5.

Wadę wykrytą przez badania radiograficzne oznacza się symbolem dwuliterowym oraz dwiema cyframi, z których pierwsza oznacza stopień wielkości wady, a druga stopień nasilenia wady, np.: Bb 23 oznacza żużle pasmowe (Bb) o stopniu wielkości 2 i stopniu nasilenia 3.

Wynikiem interpretacji radiogramu jest ocena jakości złącza. Dokonuje się jej ustalając klasę wadliwości. Norma ustala 5 klas wadliwości i oznacza je cyframi od 1 do 5, przy czym klasa 1 oznacza najmniejszą, a klasa 5 największą wadliwość złącza. O klasie złącza spawanego decyduje wada, wg której złącze zostaje zaliczone do najwyższej klasy wadliwości. W przypadku występowania trzech lub więcej rodzajów wad obowiązuje zasada, że każde dwie wady należące do tej samej klasy należy przyjąć za równoważną wadę w kolejnej niższej klasie wadliwości. Przykład takiej wadliwości złącza spawanego przedstawia tablica 23.3.

Tablica 23.3.

Stwierdzone wady na radiogramie	Klasa wadliwości złącza
Ba 12 (1), Ae 11 (1)	1
Ba 12 (1), Ab 11 (1), Ae 11 (1)	2
Aa 12(1), Aa 21(2), Bb 13(3)	3
Aa 13(2), Aa 21(2), Bb 13(3)	4
Aa 21(2), Bb 13(3), Dc 14(4)	5

23.2.8. Przebieg ćwiczenia

A. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z rentgenowską metodą oceny jakości złączy spawanych,

B. Urządzenia i materiały do badań

- stanowisko do rentgenowskich badań defektoskopowych (Liliput 120, Mira),
- radiogramy złączy spawanych,
- negatoskop,
- zestaw Polskich Norm dotyczących badań radiologicznych.

C. Przebieg badań

Zapoznać się z metodyką i techniką kontroli radiologicznej doczołowych złączy spawanych. Przygotować stanowisko do kontroli radiologicznej: przygotować złącze do badań, dobrać błonę rentgenowską, okładki wzmacniające i załadować do kasety, wybrać metodę badań i zestawić na stanowisku, dobrać natężenie i napięcie lampy oraz czas

naświetlania. Gotowość stanowiska zgłosić prowadzącemu.

Uwaga: ćwiczenie wykonujemy przy wyłączonej aparaturze rentgenowskiej

Na dostarczonym radiogramie dokonać identyfikacji wad oraz klasyfikacji złącza wg Polskich Norm. Należy określić: jakość radiogramu, rodzaj wad występujących w spoinie, ich stopień wielkości i stopień nasilenia oraz ustalić klasę wadliwości złącza.

D. Opracowanie wyników i sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- cel badań, opis przedmiotu badań, spis literatury pomocniczej,
- schemat aparatu rentgenowskiego Liliput 120 lub Mira,
- szkic otrzymanego radiogramu,
- protokół badania radiograficznego wg PN–72/M–69770,
- identyfikację wad wg PN–74/M–69771,
- klasyfikację wadliwości złącza wg PN–74/M–69772,
- wnioski.

Pytania kontrolne

1. Powstawanie promieniowania rentgenowskiego.
2. Własności promieni X i γ .
3. Wzajemne oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią.
4. Od czego zależy osłabienie wiązki promieniowania po przejściu przez materię?
5. Zasady kontroli radiologicznej.
6. Udowodnić możliwość wykrycia wady w materiale badanym.
7. Co oznacza pojęcie wykrywalność wad?
8. Co to jest fluoroskopia?
9. Czym różnią się metody radiograficzne od radiometrycznych?
10. Zasada działania aparatu rentgenowskiego Liliput 120.
11. Metodyka badań radiologicznych.
12. Zadanie okładek wzmacniających i ich rodzaje.
13. Jakość obrazu radiograficznego – metody jej określania.
14. Dobór warunków ekspozycji.
15. Typowe wady występujące w złączach spawanych i ich oznakowanie,
16. Stopień wielkości wady.
17. Stopień nasilenia wady.
18. Klasyfikacja wadliwości złączy spawanych.

Literatura

1. Rumiancew S. W. – Defektoskopia radiologiczna, WNT, W-wa 1972

2. Praca zbiorowa – Poradnik spawalnictwa, WNT, W-wa 1978
3. Polska Norma PN–72/M–69770
4. Polska Norma PN–74/M–69771
5. Polska Norma PN–74/M–69772
6. Instrukcja obsługi aparatu rentgenowskiego Liliput 120
7. Heptner H., Stroppe H. – Magnetyczne i indukcyjne badania metali. Wyd. Śląsk, Katowice 1972

23.3. Badania ultradźwiękowe

23.3.1. Własności fal ultradźwiękowych

Ultradźwiękami nazywamy drgania sprężyste o częstotliwościach wyższych od górnej granicy słyszalności ucha ludzkiego, tj. powyżej 16–20 kHz. Drgania te mogą się rozchodzić w ośrodkach gazowych, ciekłych i stałych. Mają one własności podobne do własności fal świetlnych tj. uginania się na przeszkodach, załamania, odbicia, skupiania pod postacią cienkich wiązek. W defektoskopii ultradźwiękowej podstawową rolę odgrywa zjawisko odbijania się fal od wewnętrznych nieciągłości materiału.

Rodzaje fal ultradźwiękowych

W gazach i cieczach, które wykazują jedynie sprężystość objętościową rozchodzą się fale podłużne. Natomiast w ośrodkach stałych, mających sprężystość objętościową i postaciową mogą się rozchodzić również inne rodzaje fal.

1. Fale podłużne (L)

Są to fale, przy których kierunek wychylenia drgających cząstek ośrodka jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fal. Fale takie mogą się rozchodzić jedynie w ośrodkach przestrzennie nieograniczonych a więc ośrodkach, których wymiary poprzeczne, mierzone w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali znacznie przewyższają długość fali. W tabelicy 23.4. podano długości fal podłużnych λ_L o różnych częstotliwościach rozchodzących się w niektórych ośrodkach.

Tablica 23.4.

Długość fal podłużnych λ_L o różnych częstotliwościach
w niektórych ośrodkach [cm]

Ośrodek	Częstotliwość			
	0,5 MHz	1 MHz	2,5 MHz	5 MHz
1	2	3	4	5
Aluminium	1,25	0,63	0,25	0,12
Stal	1,18	0,59	0,23	0,12

c.d. Tablicy 23.4.

1	2	3	4	5
Mosiądz	0,89	0,44	0,18	0,089
Olej min.	0,28	0,14	0,056	0,028
Powietrze	0,069	0,034	0,014	0,0069

2. Fale poprzeczne (T)

Są to fale, w których kierunek wychYLENIA cząstek ośrodka jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali. Fale poprzeczne mogą się rozchodzić jedynie w ośrodkach przestrzennie nieograniczonych.

3. Fale powierzchniowe (R)

W takiej fali cząstki ośrodka wykonują ruchy zarówno wzdłuż jak i w poprzek kierunku rozchodzenia się fali. Tory cząstek ośrodka tworzą elipsy. Fale powierzchniowe rozchodzą się w ośrodkach ograniczonych w jednym kierunku np. w grubych płytach, przy czym rozchodzą się one tylko wzdłuż powierzchni ośrodka stałego, szybko zanikając w jego głębi. W metalach fala ta zanika praktycznie już na głębokości równej ok. $1,5 \lambda$.

4. Fale Lamba (LT)

Zwane również falami płytowymi. Są to fale powstające w wyniku nałożenia się fal podłużnych i poprzecznych. Rozchodzą się w płytach lub innych ośrodkach ograniczonych równoległymi powierzchniami, np. powłokach.

5. Fale wydłużeń (L_o)

Są to fale podłużne rozchodzące się w ośrodku, którego wymiary w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali są porównywalne z jej długością. Mogą się więc one rozchodzić np. w prętach o średnicy porównywalnej z długością fali.

Ruch falowy

Obszar w którym rozchodzą się fale ultradźwiękowe nazywamy polem ultradźwiękowym. Pole to możemy opisać za pomocą wychyleń, prędkości cząstki, ciśnienia względnie naprężenia. Falę rozchodzącą się w kierunku osi x zapisujemy w postaci

$$a = A_o \sin \left[2 \pi f \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (23.6.)$$

gdzie:

a – chwilowe wychylenie cząstki,

A_o – amplituda wychylenia,

- f – częstotliwość,
- t – czas,
- x – współrzędna mierzona w kierunku ruchu fali,
- c – prędkość rozchodzenia się fali.

W gazach i cieczech mówimy o falach ciśnienia. Całkowite ciśnienie w ośrodku jest równe sumie ciśnienia atmosferycznego względnie hydrostatycznego i ciśnienia fali ultradźwiękowej. W ciałach stałych mówimy o falach naprężenia.

Dla fali płaskiej biegnącej w jednym kierunku spełniona jest następująca zależność:

$$\frac{\sigma}{V} = \rho \cdot c \quad (23.7.)$$

gdzie:

- σ – naprężenie (w cieczech i gazach ciśnienie)
- V – prędkość cząstki
- ρ – gęstość ośrodka
- c – prędkość fali

Iloczyn $\rho \cdot c$ określa akustyczne właściwości materiałów i nosi nazwę akustycznej oporności falowej (patrz tabl. 23.5.). Gdy fala nie jest płaska względnie, gdy nie biegnie tylko w jednym kierunku, wówczas stosunek naprężenia (ciśnienia) do prędkości cząstki nie jest równy ρc lecz odpowiada pewnej wielkości zespolonej, będącej funkcją wielu parametrów.

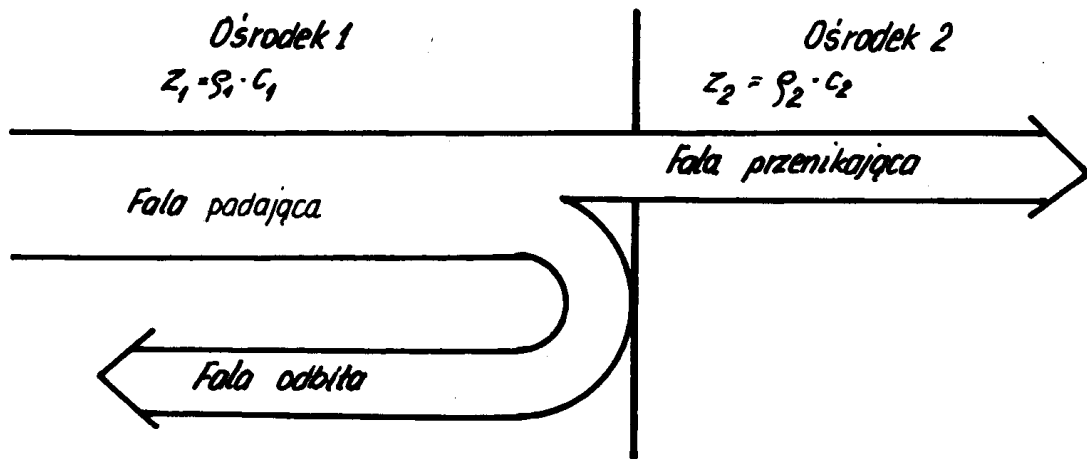
Tablica 23.5.

Charakterystyczne wielkości niektórych ośrodków

Ośrodek	Gęstość ρ [g/cm ³]	Moduł sprężystości wzdłużnej E [N/mm ²]	Współczynnik Poissona ν	Prędkość fali podłużnej C _L [m/s]	Prędkość fali poprzecznej C _T [m/s]
Aluminium	2,7	71000	0,34	6320	3120
Stal	7,8	210000	0,28	5900	3230
Mosiądz	8,1	100500	0,35	4430	2123
Olej min.	0,897	–	–	1425	–
Powietrze	1,2 · 10 ⁻³	–	–	344	–

Odbicie fal ultradźwiękowych

Gdy fala pada na granicę dwóch ośrodków, wówczas zachodzi zjawisko odbicia i przenikania (rys. 23.8.). Część fali odbija się od granicy i wraca w kierunku fali padającej, część natomiast rozchodzi się dalej w następnym ośrodku.



Rys. 23.8. Odbicie i przenikanie fali na granicy dwóch ośrodków

Jeżeli płaska fala pada na granicę dwóch ośrodków prostopadle do płaszczyzny granicznej, wówczas zjawisko to charakteryzują najlepiej współczynniki odbicia k_1 i przenikania q_1 . Współczynniki te określone są wzorami:

$$k_1 = \frac{I_{\text{odb.}}}{I_{\text{pad.}}} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (23.8.)$$

$$q_1 = \frac{I_{\text{przen.}}}{I_{\text{pad.}}} = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (23.9.)$$

gdzie:

$I_{\text{pad.}}$ – natężenie fali padającej,

$I_{\text{odb.}}$ – natężenie fali odbitej,

$I_{\text{przen.}}$ – natężenie fali przenikającej,

$Z_1 = \rho_1 \cdot c_1$ – akustyczna oporność falowa pierwszego ośrodka,

$Z_2 = \rho_2 \cdot c_2$ – akustyczna oporność falowa drugiego ośrodka.

W tabl. 23.6. zestawiono współczynniki odbicia dla różnych materiałów obliczone

Tablica 23.6.

Współczynniki odbicia k_1 fali podłużnej padającej prostopadle na granicę dwóch ośrodków [%]

Ośrodek	Akustyczna oporność falowa $\rho \cdot C_L \times 10^4$ [g/cm ² sek]	Aluminium	Stal	Mosiądz	Olej min.	Powietrze
Aluminium	170	0	21	14	74	100
Stal	456	21	0	1	89	100
Mosiądz	361	14	1	0	87	100
Olej min.	12,8	74	89	87	0	100
Powietrze	0,0041	100	100	100	100	0

ze wzoru (23.8.). Z przedstawionej tablicy wynika, że współczynnik odbicia jest szczególnie duży przy przejściu fali z ośrodka stałego lub z cieczy do gazu lub na odwrót. Tak więc fale ultradźwiękowe rozchodzące się w ciałach stałych lub w cieczach praktycznie nie przenikają do otaczającego ich powietrza.

Załamane fal ultradźwiękowych

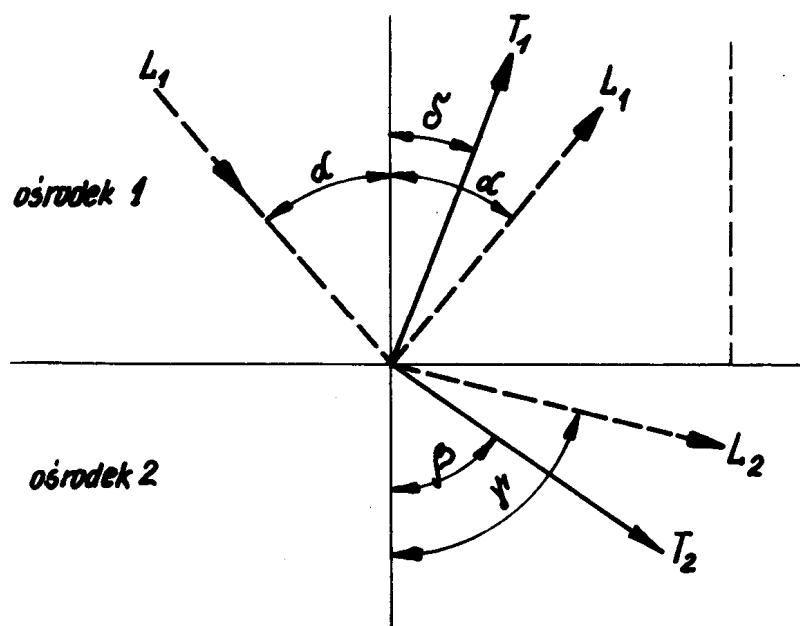
Jeżeli fala podłużna lub poprzeczna pada ukośnie na granicę dwóch ośrodków, wówczas na granicy tej powstają dwa typy fal: podłużna i poprzeczna, które w najogólniejszym przypadku rozchodzą się w obu ośrodkach (rys. 23.9.) Kierunki rozchodzenia się tych fal związane są z ich prędkościami prawem Snelliusa

$$\frac{\sin \alpha}{C_{L1}} = \frac{\sin \delta}{C_{T1}} = \frac{\sin \gamma}{C_{L2}} = \frac{\sin \beta}{C_{T2}} \quad (23.10.)$$

Jeśli prędkości fal ultradźwiękowych w ośrodku 2 są większe niż w ośrodku 1, wówczas kąty β , γ są większe od odpowiednich kątów δ , α . Zwiększając kąt padania α fali podłużnej L_1 możemy doprowadzić do takiej sytuacji, że kąt γ osiągnie wartość 90° . Jeżeli kąt α jeszcze zwiększymy, wówczas fala L_2 w ogóle nie wniknie do ośrodka 2 i mamy do czynienia z całkowitym wewnętrznym załamaniem fali.

Zjawisko załamania fal ultradźwiękowych wykorzystywane jest do:

a/ Wytwarzania fal poprzecznych



Rys. 23.9. Załamanie fali padającej ukośnie na granicę dwóch ośrodków

Dobierając odpowiednio kąt α możemy przekształcić falę podłużną L_1 w poprzeczną T_2 i wprowadzić ją do ośrodka 2 pod kątem β .

b/ Wytwarzania fal powierzchniowych

Dobieramy taką wartość kąta α aby $\beta = 90^\circ$, wówczas fala T_2 będzie biegła wzdłuż granicy obu ośrodków. Jeżeli ośrodek 1 odetniemy wzdłuż linii przerywanej, pokazanej na rys. 23.9. z prawej strony, wówczas fala ta będzie się poza tą linią rozchodziła po powierzchni drugiego ośrodka jako fala powierzchniowa.

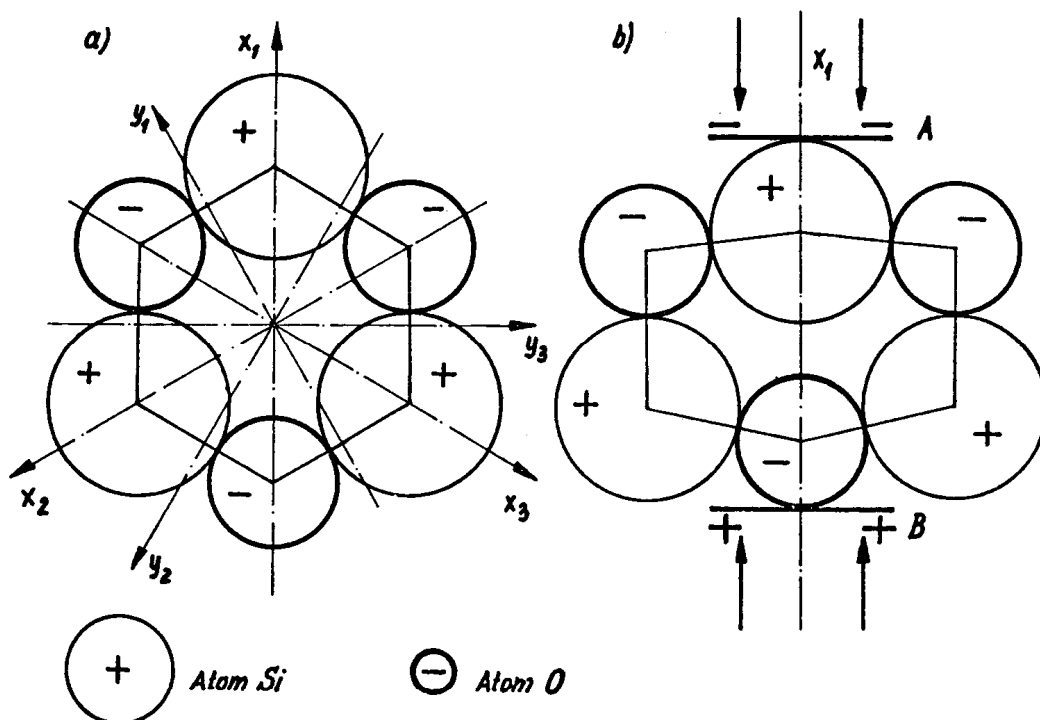
23.3.2. Wytwarzanie fal ultradźwiękowych

Fale ultradźwiękowe wytwarzamy przy pomocy przetworników ultradźwiękowych, które umożliwiają zamianę energii drgań elektrycznych w energię drgań mechanicznych i odwrotnie.

W zakresie drgań ultradźwiękowych stosowane są dwa rodzaje przetworników:

- magnetostrykcyjne, stosowane w zakresie częstotliwości do 100–200 kHz, ponieważ przy wyższych częstotliwościach szybko rosną straty cieplne,
- piezoelektryczne, stosowane przy wyższych częstotliwościach.

Obecnie stosowane są prawie wyłącznie przetworniki piezoelektryczne. Wykonujemy je z materiałów wykazujących własności piezoelektryczne. Zaliczamy do nich: kwarc SiO_2 , siarczan litu LiSO_4 , tytanian baru BaTiO_3 , cyrkonian ołowiu PbZrO_3 , tytanian ołowiu PbTiO_3 .



Rys. 23.10. Mechanizm zjawiska piezoelektrycznego

Mechanizm zjawiska piezoelektrycznego można wyjaśnić poglądowo na podstawie rys. 23.10. Strukturę krystaliczną kwarcu, którego skład chemiczny określony jest wzorem SiO_2 , można przedstawić jako układ 3 atomów krzemu oraz 6 atomów tlenu. Atomy krzemu mają po 4 dodatnie elektryczne ładunki elementarne, natomiast atomy tlenu po 2 ładunki ujemne. Na rys. 23.10a. przedstawiono uproszczony rozkład atomów. Pod trzema atomami tlenu leżą pozostałe 3 atomy tlenu, których w przedstawionym widoku z góry nie widać. Ładunki elektryczne atomów krzemu i tlenu znoszą się wzajemnie. Jeśli wzdłuż osi X ściśniemy kryształ (rys. 23.10.b), wówczas atom krzemu zostanie wciśnięty między atomy tlenu, a atom tlenu między atomy krzemu. W ten sposób powstaną na okładkach metalicznych AB pokazane tam ładunki elektryczne. I odwrotnie, napięcie przyłożone do okładek AB wytworzy w kryształach pole elektryczne pod wpływem którego przesuną się atomy tlenu i krzemu, kryształ zatem się odkształci.

Przetworniki ultradźwiękowe mają najczęściej kształt cienkich płytek lub krążków. Przetworniki takie pracują najlepiej przy częstotliwości rezonansowej. Dla płytki o równoległych ścianach rezonans zachodzi wówczas gdy grubość płytki g jest równa wielokrotności połowy długości fali

$$g = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (23.11.)$$

Zasadnicze wielkości fali ultradźwiękowej związane są ze sobą następującą zależnością

$$c = \lambda \cdot f \quad (23.12.)$$

i wobec tego po podstawieniu $n = 1$, otrzymujemy

$$f = \frac{c}{2g} \quad (23.13.)$$

gdzie:

f – podstawowa częstotliwość rezonansowa

c – prędkość rozchodzenia się fali w materiale przetwornika.

Wyrażając grubość przetwornika w milimetrach otrzymujemy:

$$f = \frac{2,88}{g} \quad [\text{MHz}]$$

- dla przetworników wykonanych z kwarcu przy wytwarzaniu fal podłużnych (cięcie X),

$$f = \frac{1,92}{g} \quad [\text{MHz}]$$

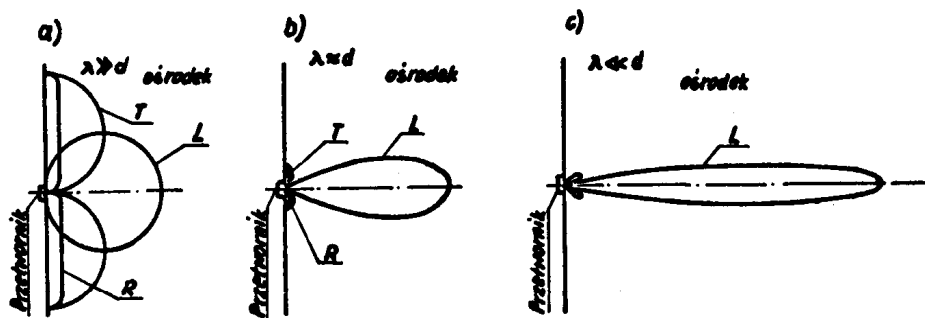
- dla przetworników wykonanych z kwarcu przy wytwarzaniu fal poprzecznych (cięcie Y),

$$f = \frac{2,20}{g} \quad [\text{MHz}]$$

- dla przetworników wykonanych z BaTiO_3 (otrzymujemy tylko fale podłużne)

Jak już uprzednio wspomniano obszar ośrodka, w którym rozchodzą się fale ultradźwiękowe nazywamy polem ultradźwiękowym. Pole ultradźwiękowe, którego kształt jest uzależniony od kształtu i wymiarów przetwornika oraz od długości powstającej fali, dzielimy na dwa obszary różniące się zasadniczo między sobą: pole dalekie i pole bliskie. Granica między tymi polami biegnie w odległości $d^2/4 \lambda$ od przetwornika.

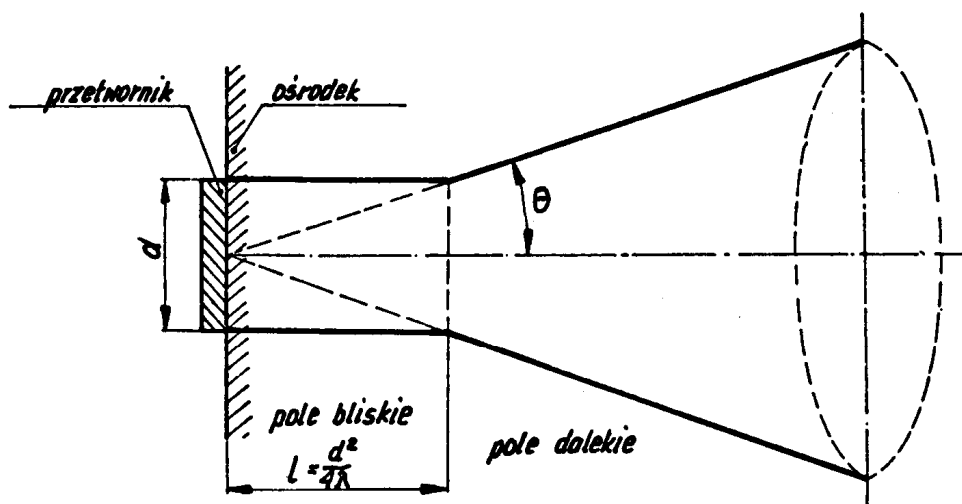
Pole dalekie określone jest przez charakterystykę kierunkowości. Charakterystyka taka jest krzywą narysowaną we współrzędnych biegunowych w ten sposób, że na współrzędnej r poprowadzonej pod kątem θ odkłada się stosunek amplitudy fali wysyłanej przez źródło w danym kierunku do amplitudy fali wysyłanej w kierunku $\theta = 0^\circ$. Charakterystyki kierunkowości są dość proste, gdy przetwornik ultradźwiękowy drga w cieczy, bowiem występuje wtedy wyłącznie fala podłużna. W ośrodkach stałych charakterystyki kierunkowości są bardziej złożone wskutek występowania różnych rodzajów fal (rys. 23.11.). Gdy długość fali przewyższa znacznie średnicę przetwornika ($\lambda \gg d$), wówczas w polu ultradźwiękowym występują fale L, T i R (rys. 23.11.a). Prostopadle do powierzchni przetwornika powstaje tylko pole fal podłużnych. Pole fal poprzecz-



Rys. 23.11. Przybliżone charakterystyki kierunkowości przetwornika kwarcowego o cięciu X wytwarzającego fale ultradźwiękowe w ośrodku stałym: L – fale podłużne, T – fale poprzeczne, R – fale powierzchniowe

nym przechodzi w pobliżu powierzchni materiału w pole fal powierzchniowych. Na powierzchni materiału występują wyłącznie fale powierzchniowe. Przy $\lambda \approx d$ (rys. 23.11.b) pola fal poprzecznych i powierzchniowych zanikają względem pola fal podłużnych. Gdy $\lambda \leq d$ (rys. 23.11.c), wówczas zupełnie zanika pole fali poprzecznej i powierzchniowej, natomiast pole fali podłużnej stopniowo się wydłuża. W polu dalekim amplituda fali maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości rozpatrywanego punktu od źródła. Natężenie fali maleje wówczas odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości, co odpowiada rozprzestrzenianiu się energii w stożku o kącie rozbieżności θ (rys. 23.12.). Kąt ten najczęściej wyznaczamy z wzoru:

$$\sin \theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (23.14.)$$



Rys. 23.12. Pole bliskie i dalekie

Inaczej przebiegają zjawiska w polu bliskim. W polu tym natężenie wytworzonych przez przetwornik fal nie jest stałe: zmienia się ono z miejsca do miejsca dając szereg minimów i maksimów rozłożonych wzdłuż i w poprzek wiązki.

Pole ultradźwiękowe wytworzone przez przetwornik w kształcie krążka o średnicy d możemy przedstawić schematycznie tak, jak to pokazuje rysunek 23.12. Pole bliskie ma kształt walca o średnicy d i w odległości równej $d^2/4 \lambda$ przechodzi w stożek o wierzchołku położonym w środku przetwornika i kącie rozwarcia θ .

23.3.3. Metody defektoskopowych badań ultradźwiękowych

Ultradźwiękowe metody wykrywania nieciągłości materiałów dzielimy na:

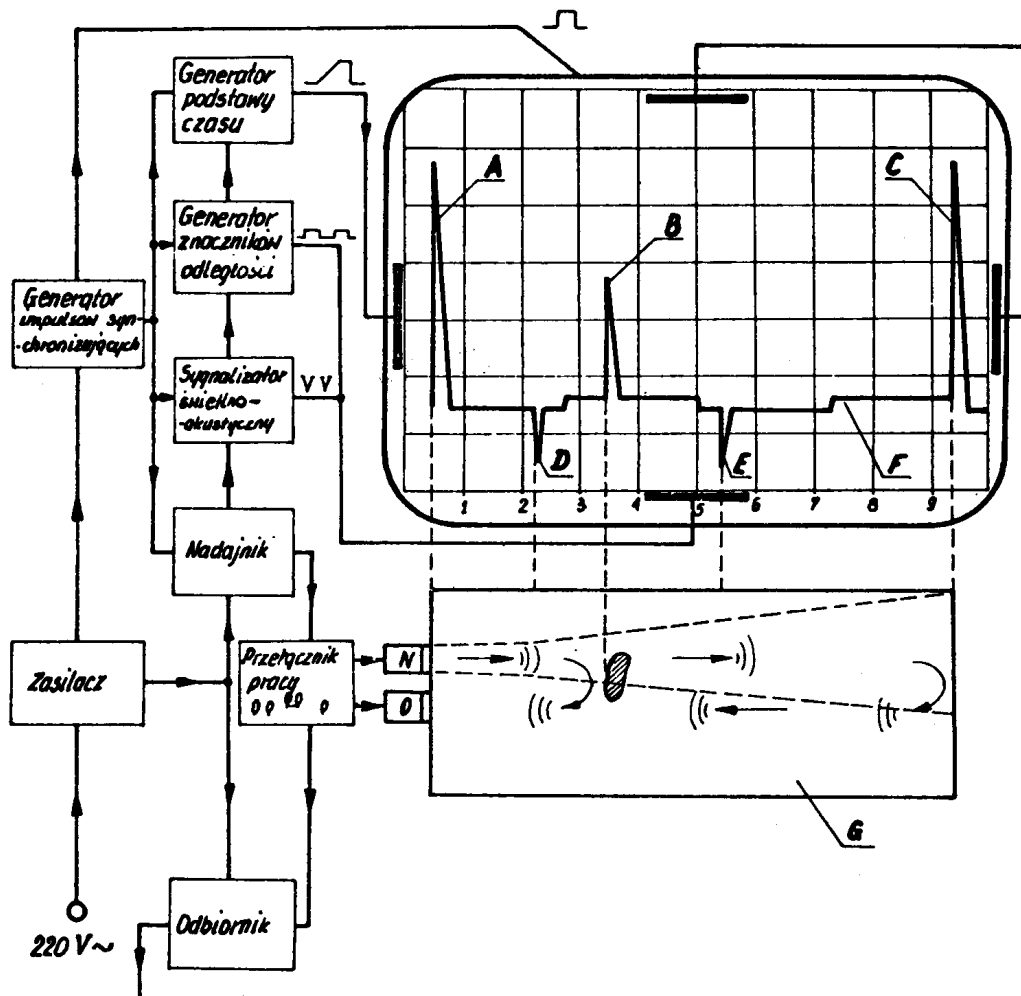
- a/ metodę echa,
- b/ metodę cienia zwaną metodą przepuszczania,
- c/ metodę rezonansu.

Podział taki ma uzasadnienie praktyczne ze względu na stosowaną aparaturę i na różne możliwości wykrywania wad tymi metodami. Każda z tych metod może być realizowana sposobem kontaktowym lub zanurzeniowym. O sposobie kontaktowym mówimy wówczas gdy głowica ultradźwiękowa z wbudowanym przetwornikiem oddzielona jest od badanego przedmiotu tylko cienką warstewką substancji sprzęgającej, natomiast w przypadku sposobu zanurzeniowego badany element jest całkowicie zanurzony w cieczy.

Metoda echa

Metoda echa polega na wytworzeniu i wprowadzeniu do badanego materiału impulsów fal ultradźwiękowych oraz ich odbiorze po odbiciu od wady materiałowej lub od powierzchni ograniczającej. Wada materiałowa jest obszarem o akustycznej oporności falowej różniącej się na ogół znacznie od akustycznej oporności falowej badanego materiału. Jeśli zatem stwierdzimy, że w badanym materiale występuje zjawisko odbicia fal, możemy wnioskować o występowaniu nieciągłości.

W defektoskopie ultradźwiękowym (rys. 23.13.) nadawanie impulsów fal odbywa się przy pomocy głowicy, która wytwarza krótki sygnał, składający się z kilku drgań o określonej częstotliwości. Czas trwania tego sygnału, zwany szerokością impulsu, wynosi od kilku do kilkunastu mikrosekund. Wytworzona przez głowicę fala ultradźwiękowa rozchodzi się w badanym materiale, odbija od wad lub powierzchni ograniczających przedmiotu i powraca do przetwornika, który zamienia ją na impulsy elektryczne. Impulsy te po wzmocnieniu doprowadzane są na płytki odchylenia pionowego lampy oscyloskopowej. Jednocześnie z nadawanym impulsem ultradźwiękowym zostaje wyzwolona podstawa czasu lampy oscyloskopowej i wobec tego w momencie odbioru przez głowicę impulsu odbitego od wady plamka podstawy czasu znajduje się w określonym miejscu i zostaje w tym miejscu odchylona do góry. Otrzymane odchylenie plamki, mające postać wyraźnego piku, nazywamy echem wady lub echem powierzchni ograniczającej (rys. 23.13.). Nadawanie impulsu ultradźwiękowego jest powtarzane np. kilkaset razy w ciągu



Rys. 23.13. Schemat blokowy ilustrujący zasadę działania defektoskopu DUR-20 zastosowanego do metody echa: A – impuls nadany przez głowicę nadawczą, B – impuls odbity od wady, C – impuls odbity od dna próbki, D – impuls znakujący początek strefy strzeżonej przez sygnalizator, E – impuls znakujący koniec strefy strzeżonej przez sygnalizator, F – elektroniczne znaczniki odległości, G – próbka

sekundy i wobec tego na ekranie lampy obserwujemy nieruchomy obraz. Podstawa czasu defektoskopu ultradźwiękowego jest wyskalowana albo przy pomocy elektronicznych znaczników odległości (dla stali) albo za pomocą wzorców z badanego materiału. Umożliwia to bezpośrednio odczytywanie z ekranu lampy oscyloskopowej odległości wady od miejsca przyłożenia głowicy. W przypadku badania materiału innego niż stal możemy dokonać przeskalowania elektronicznych znaczników odległości według wzoru:

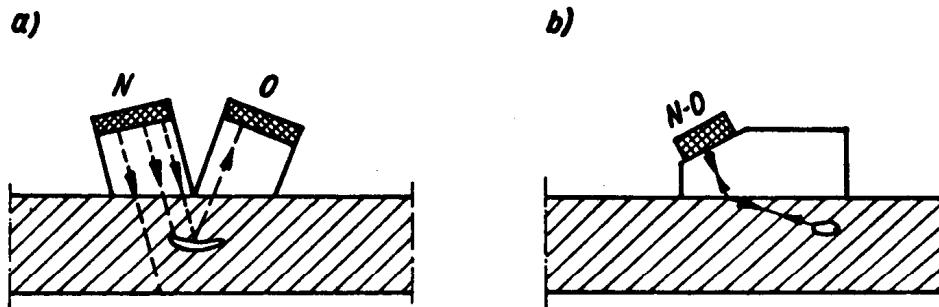
$$l_x = l_{\text{stal}} \cdot \frac{C_x}{C_{\text{stal}}} \quad (23.15.)$$

gdzie:

l_x, l_{stal} – długość poziomego odcinka znacznika odległości odpowiednio dla badanego materiału i stali,

C_x, C_{stal} – prędkości fali ultradźwiękowej odpowiednio w badanym materiale i stali.

W badaniach metodą echa istnieje możliwość stosowania jednej głowicy nadawczo-odbiorczej lub dwóch niezależnych głowic nadawczej i odbiorczej. Przy stosowaniu głowicy pojedynczej występuje tzw. strefa martwa spowodowana faktem, że proces nadawania sygnału ultradźwiękowego trwa pewien czas, czyli sygnał posiada pewną szerokość. Jeżeli w czasie nadawania tego sygnału dotrze do głowicy fala odbita od wady umieszczonej dość blisko powierzchni badanego przedmiotu, wówczas echa wady nie uda się odróżnić od nadawanego impulsu, bowiem ten ostatni jest zawsze znacznie większy od echa wady. Zasięg strefy martwej można orientacyjnie ocenić wartością iloczynu czasu trwania impulsu nadawanego i prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w badanym materiale. Strefa martwa może być zlikwidowana przez zastosowanie dwóch oddzielnych głowic nadawczej i odbiorczej, nachylonych względem siebie (rys. 23.14.a) lub przez zastosowanie osłony skośnej przetwornika nadawczo-odbiorczego na fale poprzeczne (rys. 23.14.b).



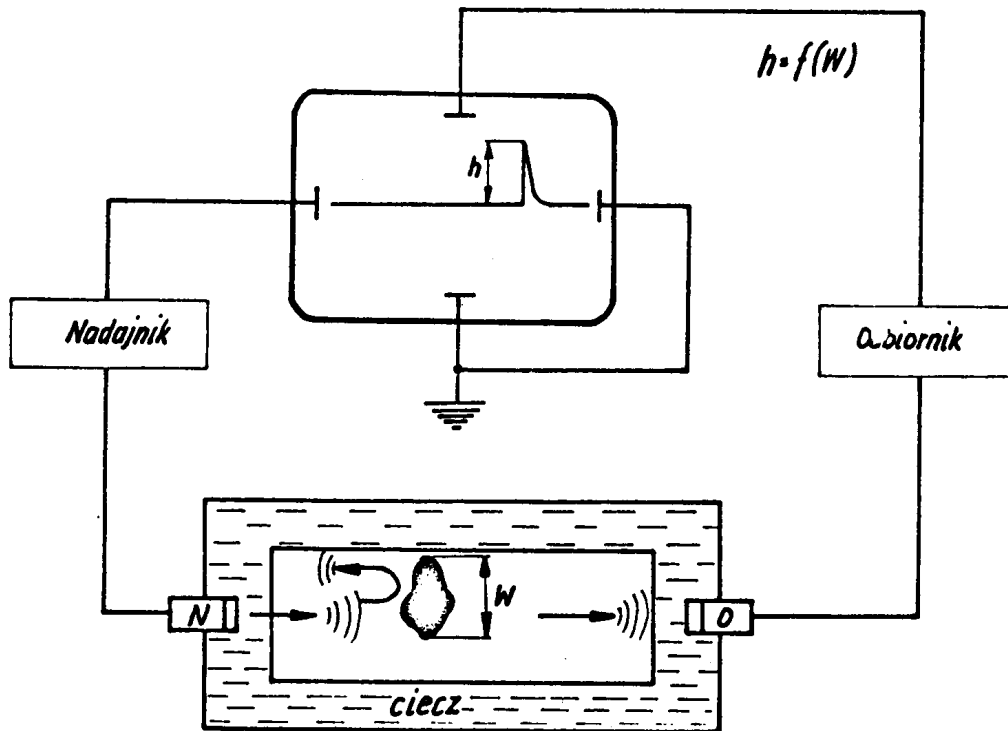
Rys. 23.14. Eliminowanie strefy martwej w metodzie echa: a/ przy pomocy dwóch oddzielnych nieco nachylonych przetworników; nadawczego i odbiorczego, b/ przy pomocy osłony skośnej przetwornika nadawczo-odbiorczego na fale poprzeczne

Dużą zaletą metody echa jest duża czułość, pozwalająca na wykrywanie bardzo małych wad nawet w dużych obiektach. W przypadku tylko jednostronnego dostępu do badanego elementu jest to praktycznie jedyna metoda możliwa do zastosowania. Warunkiem koniecznym skuteczności tej metody jest drobne ziarno badanego materiału, znacznie mniejsze od poszukiwanych wad. Wadą metody echa jest jej rozdzielczość ograniczona szerokością nadawanego impulsu, co utrudnia zastosowanie tej metody do badania małych elementów.

Metoda cienia

Metoda cienia, zwana również metodą przepuszczania, polega na wprowadzeniu fal

ultradźwiękowych z jednej strony badanego przedmiotu i na odbieraniu ich z drugiej strony po przejściu przez ten przedmiot. Każda wada materiałowa odbija fale ultradźwiękowe, tworząc za sobą jak gdyby cień, co powoduje osłabienie natężenia fal przechodzących przez obszar z wadą. W metodzie tej stosuje się dwie oddzielne głowice, z których jedna jest nadawczą, natomiast druga odbiorczą (rys. 23.15.).



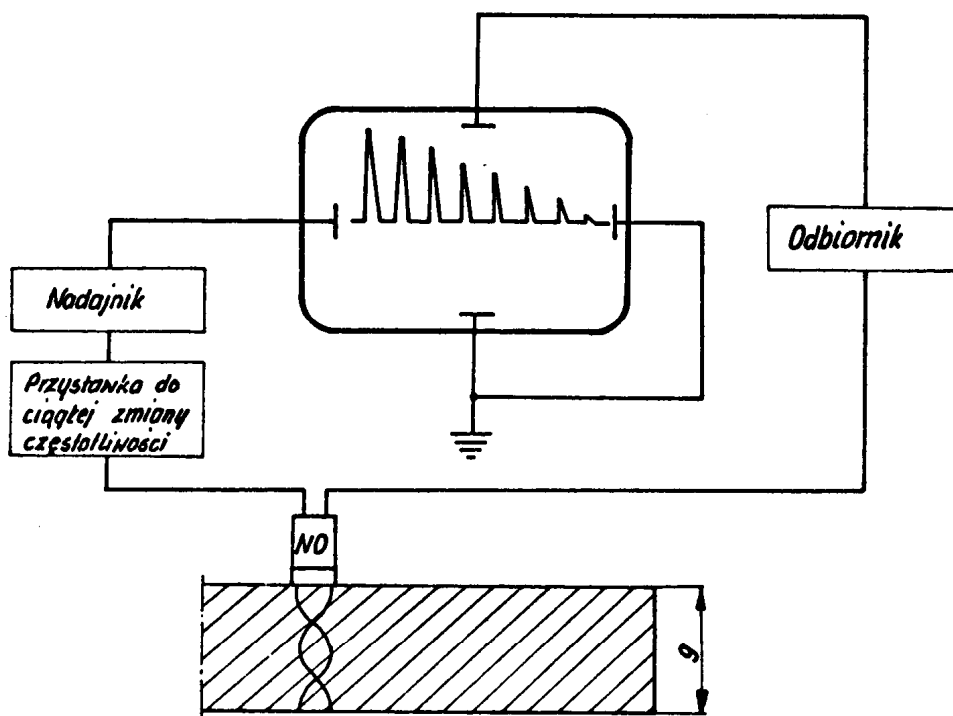
Rys. 23.15. Schematyczne przedstawienie metody cienia

Sygnały powstające w głowicy odbiorczej są doprowadzane albo do elektrod lampy oscyloskopowej albo też do wskaźnika wychyłowego. O obecności wady w badanym przedmiocie wnioskujemy na podstawie zmniejszenia sygnału odbieranego przez głowicę odbiorczą. Wadą metody cienia jest niewątpliwie, w porównaniu z metodą echa, konieczność dwustronnego dostępu do powierzchni badanego elementu oraz konieczność umieszczenia głowic dokładnie naprzeciw siebie co znacznie utrudnia badania. Prócz tego metodą cienia nie można ustalić, w jakiej odległości od głowicy znajduje się wada. Najmniejsze wady, jakie mogą być wykryte metodą cienia, nie są mniejsze niż w przypadku metody echa, ale wykrywanie ich jest możliwe tylko w cienkich warstwach materiału o grubości rzędu kilku milimetrów. Jest to spowodowane uginaniem się fal ultradźwiękowych za wadą, której cień ultradźwiękowy ma kształt stożka i zanika w pewnej odległości od wady. Metoda cienia ma jednak zalety, które w pewnych przypadkach decydują o jej zastosowaniu. Przy metodzie tej nie ma często dolnego ograniczenia grubości bada-

nego materiału, co umożliwia badanie rozwarstwień w cienkich blachach. Dużą zaletą metody cienia jest to, że umożliwia badanie materiałów o gruboziarnistej strukturze oraz materiałów o nierównej powierzchni, w których silne odbijanie fal ultradźwiękowych na granicach ziarn lub nierówności uniemożliwia otrzymanie obrazu odbicia od wady przy metodzie echa.

Metoda rezonansu

Metoda rezonansu oparta jest podobnie jak metoda echa na zjawisku odbicia fal ultradźwiękowych od wady materiałowej lub powierzchni ograniczającej, jednak podczas gdy w impulsowej metodzie echa odbicie od wady obserwuje się oddzielnie od obrazu fal wysyłanych, to w metodzie rezonansu ma miejsce nakładanie się na siebie fal padających i odbitych. Jeżeli fala wysyłana jest zgodna w fazie z falą odbitą od wady lub powierzchni ograniczającej, wówczas wytwarza się fala stojąca i obserwujemy rezonans (patrz wzór 23.11.). Zjawisko rezonansu możemy wykorzystać do pomiaru grubości warstwy, w której zachodzi rezonans (rys. 23.16.), co pozwala np. określić grubość materiału jednostronnie dostępnego lub odległość rozwarstwienia od powierzchni materiału.



Rys. 23.16. Schematyczne przedstawienie metody rezonansu

W celu obliczenia odległości wady od powierzchni materiału lub jego grubości na-

ależy znać prędkość c rozchodzenia się w nim fal ultradźwiękowych oraz należy zmierzyć częstotliwość drgań, dla których zachodzi rezonans. Jeżeli przy pomiarach grubości materiału posługujemy się dwoma dowolnymi częstotliwościami f_1 i f_2 , między którymi zawartych jest k rezonansów, wówczas

$$g = k \cdot \frac{c}{2(f_2 - f_1)} \quad (23.16.)$$

Z przedstawionego wzoru wynika, że im większa jest grubość materiału g , tym więcej występuje rezonansów w określonym przedziale częstotliwości.

Metodą rezonansu można również wykrywać rozwarstwienia, braki przyczepności w połączeniach lutowanych, platerowanych i klejonych a także występowanie korozji.

23.3.4. Głowice ultradźwiękowe i dobór częstotliwości drgań

Skuteczność wykrywania wad metodami ultradźwiękowymi zależy w dużym stopniu od konstrukcji i wyboru odpowiedniego rodzaju głowicy. Ze względu na wielkość kąta, pod którym wprowadzamy wiązkę fal ultradźwiękowych do badanego materiału różniamy dwa podstawowe rodzaje głowic ultradźwiękowych: głowice normalne i głowice skośne. Głowice normalne są głowicami uniwersalnymi, wytwarzającymi fale podłużne wprowadzane prostopadle do powierzchni badanego materiału. Mogą być one używane jako głowice nadawczo-odbiorcze albo jako niezależne głowice nadawcze i odbiorcze. Budowane są głowice normalne wytwarzające fale ultradźwiękowe o różnych częstotliwościach, np. defektoskop typu Dur-20 wyposażony jest w głowice normalne wytwarzające fale podłużne o częstotliwościach: 0,8; 1,5; 2; 3; 6; 8; 10 MHz, przy czym często głowice wytwarzające fale ultradźwiękowe o tej samej częstotliwości mogą mieć przetworniki o różnych średnicach. Stosowanie dużej powierzchni przetwornika powoduje zmniejszenia kąta rozbieżności wysyłanej wiązki fal (patrz wzór 23.14.) oraz zwiększa moc odbieraną przez głowicę odbiorczą. Przetworniki o dużej powierzchni należy stosować szczególnie w tych przypadkach, gdy wskutek stosowania małej częstotliwości rozbieżność stosowanej wiązki jest duża.

Głowice skośne służą do wytwarzania fal poprzecznych wprowadzanych pod różnymi kątami do badanych materiałów. Głowica taka w porównaniu z głowicą normalną różni się w zasadzie jedynie klinową nasadką wykonaną najczęściej z polimetakrylanu metylu. Głowice skośne wykonywane są dla różnych częstotliwości fal poprzecznych oraz o różnych kątach załamania fali, np. dla stali – 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80° . Podczas badań przy pomocy głowic skośnych należy pamiętać, że zmienia się odległość wskazywana przez znaczniki na ekranie lampy oscyloskopowej, ponieważ prędkość fal poprzecznych jest około dwa razy mniejsza od prędkości fal podłużnych (tabl. 23.5.)

Dla materiałów innych niż stal zmianie ulega również kąt załamania β wiązki wprowadzanej do badanego materiału (patrz wzór 23.10.) Głowice skośne znajdują zastosowanie przy wykrywaniu wad w połączeniach spawanych, blachach oraz w miejscach trudno dostępnych.

Przy wyborze głowicy do badań defektoskopowych istotną rolę odgrywa częstotliwość fal ultradźwiękowych. Ze wzrostem stosowanej częstotliwości maleje długość fali w badanym ośrodku dzięki czemu wzrasta możliwość wykrywania wad. Na ogół przyjmuje się, że przy pomocy metody echa można wykryć wady, których wymiar jest równy co najmniej połowie długości fali. Wpływowi temu przeciwstawia się tłumienie fal ultradźwiękowych w badanym ośrodku, które wzrasta ze wzrostem częstotliwości szczególnie szybko, gdy długość powstającej fali zbliża się do wielkości ziarna. Z tego względu dla materiałów o strukturze gruboziarnistej i chropowatej powierzchni należy wybierać mniejsze częstotliwości fal. Orientację w zakresach częstotliwości fal ultradźwiękowych stosowanych w badaniach defektoskopowych umożliwia tablica 23.7.



Tablica 23.7.

Zakres częstotliwości fal ultradźwiękowych stosowanych w badaniach defektoskopowych

Częstotliwość [MHz]	Materiał
0,025–0,5	beton, drewno, skały, materiały o gruboziarnistej strukturze
0,2–4	miedź, stal austenityczna, żeliwo
0,2–2	tworzywa sztuczne, materiały proszkowane, bazalt, laminaty
1–5	wyroby walcowane
2–10	wyroby prasowane
1–10	odkuwki, szkło, ceramika
2–6	połączenia spawane

Zgodnie z normą PN–77/M–70055 stosowane w badaniach głowice winny być opisane z podaniem ustalonej charakterystyki. I tak należy kolejno podawać:

- częstotliwość wytwarzanych fal ultradźwiękowych (w MHz),
- rodzaj fal (L – podłużne, T – poprzeczne, R – powierzchniowe),
- kąt załamania w stopniach,
- wymiary przetwornika w milimetrach,
- rodzaj przetwornika (C – ceramiczny, K – kwarcowy).

Np. symbol 2LO⁰ – 16C oznacza głowicę wytwarzającą fale podłużne o częstotliwości 2 MHz, kącie załamania 0⁰, zaopatrzoną w przetwornik ceramiczny o średnicy 16mm. Miejsce wprowadzenia fal ultradźwiękowych zaznacza się symbolem , przy którym dodatkowo podaje się oznaczenia głowic, np. , zawierające częstotliwość i rodzaj fal oraz kąt załamania.

Poza powyższymi oznaczeniami i symbolami są stosowane szczególnie przez producentów pewne inne symbole ogólne. I tak np. ZZG "Inco" i Spółdzielnia Pracy "Radiotechnika" znakują głowice następującymi symbolami:

- pierwsza litera: G – głowica, O – osłona,
- druga litera podaje rodzaj głowicy: N – normalna, S – skośna,
- trzecią litera podaje rodzaj wytwarzanych fal ultradźwiękowych: L – fale podłużne, T – fale poprzeczne, Z – zmienne rodzaje fal.

Dalsze symbole oznaczają kolejny typ konstrukcji i kąt wprowadzenia wiązki fal ultradźwiękowych do stali. Tak więc głowica fal podłużnych ma zawsze symbol GNL, podobnie jak głowica fal poprzecznych symbol GST (osłona—OST).

23.3.5. Badanie złączy spawanych

Badania połączeń spawanych stanowią odrębne zagadnienie w defektoskopii ultradźwiękowej. Możliwość określenia rodzaju wady na podstawie obrazu oscyloskopowego a w szczególności jej położenia i wielkości zależy w dużej mierze od doświadczenia pracownika wykonującego badania. Do badań złączy spawanych używa się z reguły fal poprzecznych wprowadzanych skośnie do badanego materiału. Najczęściej stosujemy metodę echa z jedną głowicą nadawczo-odbiorczą (rys. 23.17.). Pewną odmianą tego sposobu jest praca dwoma oddzielnymi głowicami nadawczą i odbiorczą, dzięki czemu eliminujemy strefę martwą.

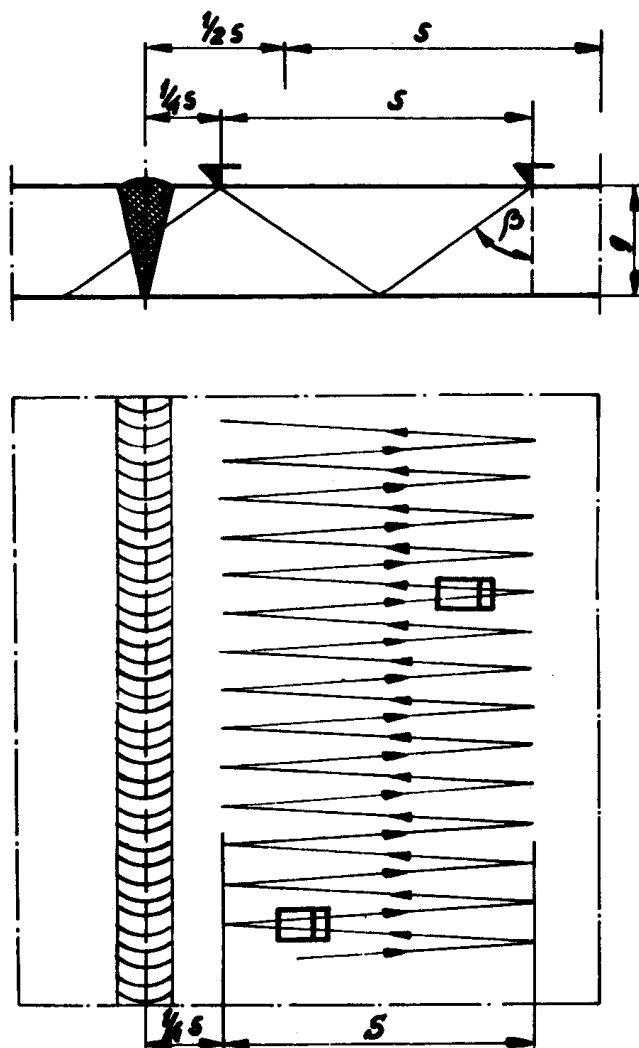
W celu zbadania całego przekroju spoiny, należy zmieniać położenie głowicy skośnej w obszarze ograniczonym przez dwie linie równoległe do osi spoiny, położone w odległości 1/4 S i 5/4 S od tej osi. Wielkość S oznacza tzw. skok głowicy skośnej:

$$S = 2g \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (23.17.)$$

gdzie:

- g – grubość blachy,
- β – kąt załamania fali.

Jeżeli wielkość głowicy nie pozwala na takie zbliżenie jej do spoiny, ażeby środek wiązki fal przechodził przez środek spoiny, to odległość obu równoległych linii można powiększyć do 1/2 S i 3/2 S (rys. 23.17.). W tak wyznaczonym obszarze przesuwu głowicę prowadzi się ruchem zygzakowatym. Przy przesuwaniu głowicy między zaznaczonymi liniami równoległymi fala ultradźwiękowa przechodzi dwukrotnie przez cały przekrój spoiny. Jeżeli fala pada bezpośrednio na wadę bez odbicia od powierzchni blachy,



Rys. 23.17. Przykład badania złącza spawanego falą poprzeczną za pomocą jednej głowicy nadawczo-odbiorczej

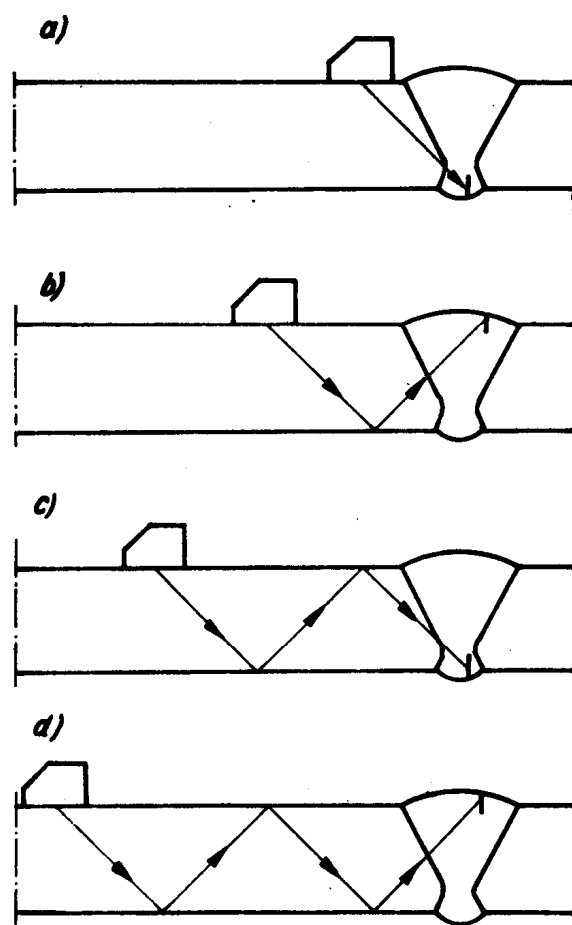
wówczas mówimy o wykrywaniu wad falą bezpośrednią. Jeżeli natomiast fala ultradźwiękowa dociera do wady po jednokrotnym, dwukrotnym, trzykrotnym itd. odbiciu od powierzchni blachy, wówczas mówimy o wykrywaniu wad falą odbitą jedno-, dwu-, trzykrotnie (rys. 23.18.). Kąt załamania fali poprzecznej dobieramy w zależności od grubości spoiny (tab. 23.8.).

O rodzaju wad występujących w złączach spawanych można wnioskować na podstawie kształtu impulsu oraz zmiany jego wielkości przy obrocie głowicy dookoła wady: przy wadach płaskich (C, Da, Db, E, Fc według PN-74/M-69771) echo jest wąskie i zanika przy obrocie, natomiast w przypadku wad przestrzennych (Aa, Ab, Ba, Bd) echo jest bardziej postrzępione i nie zanika tak szybko przy obrocie.

Tablica 23.8.

Wartości kątów załamania głowic skośnych stosowanych do badań spoin

Grubość blachy g [mm]	Kąt załamania β [stop]
do 15 mm	70° – 80°
15–30	60° – 70°
30–50	45° – 60°
ponad 50 mm	35° – 45°



Rys. 23.18. Badanie spoin fałą: a/ bezpośrednią, b/ odbitą jednokrotnie, c/ odbitą dwukrotnie, d/ odbitą trzykrotnie

23.3.6. Przebieg ćwiczenia

A. Cel ćwiczenia

Praktyczne zapoznanie się z metodami defektoskopowych badań ultradźwiękowych i zakresem ich stosowania.

B. Urządzenia i materiały do badań

Przedmiotem badań są następujące elementy: doczołowe złącze spawane, wał wy-

korbiony, blok stalowy z wadami sztucznymi, blok aluminiowy z wadami naturalnymi, odcinki rur o różnych grubościach ścianek. Do wykonania ćwiczenia niezbędne są następujące urządzenia i materiały pomocnicze:

- defektoskop ultradźwiękowy typu DUR–20 lub DI–22,
- zestaw głowic ultradźwiękowych normalnych i skośnych,
- grubościomierz ultradźwiękowy typ 545 H z odczytem cyfrowym,
- instrukcje obsługi w/w aparatury,
- olej wrzecionowy, suwmiarka, przymiar milimetrowy,
- próbki wzorcowe wykonane z różnych materiałów do kalibrowania podstawy czasu.

C. Przebieg badań

Podczas wykonywania ćwiczenia studenci realizują jeden z niżej wymienionych wariantów badań:

1. Wykrywanie wad w złączu spawanym przy pomocy głowicy skośnej.
2. Wykrywanie wad metodą echa jedną głowicą nadawczo-odbiorczą.
3. Wykrywanie wad metodą cienia przy pomocy dwóch niezależnych głowic nadawczej i odbiorczej.
4. Wykrywanie rozwarstwień w blachach oraz pomiar grubości elementów stalowych jednostronnie dostępnych.

Przydziału obiektu badań dokonuje prowadzący zajęcia. Przed przystąpieniem do badań należy zapoznać się z budową, zasadą działania oraz warunkami bezpiecznej obsługi aparatury ultradźwiękowej. Przy wyborze głowicy należy kierować się rodzajem i kształtem badanego przedmiotu oraz rodzajem wad, które należy wykryć. Uruchomienie defektoskopu i podłączenie głowic odbywa się pod kierunkiem prowadzącego ćwiczenia lub pracownika inż.-technicznego. Regulację defektoskopu należy prowadzić zgodnie z zaleceniami podanymi w instrukcji obsługi.

Uwaga: przed przystąpieniem do pracy defektoskop należy koniecznie uziemić.

Powierzchnia badanego przedmiotu, do której przykładamy przetwornik, winna być dokładnie oczyszczona i pokryta warstwą cieczy (np. olejem). Zasięg pomiarowy defektoskopu dobieramy w zależności od wymiarów badanego elementu. W metodzie echa impuls nadany (rys. 23.13.) powinien być widoczny na skrajnej lewej działce, a impuls odbity od dna na skrajnej prawej działce płytki z naniesioną skalą. Przesuwając głowicę po powierzchni badanej próbki należy obserwować położenie pojawiających się impulsów. Na podstawie uzyskanego oscylogramu oraz wyskalowanych dla badanego materiału znaczników odległości możemy dokładnie określić położenie wady i oszacować jej wielkość.

W metodzie cienia głowice przykładamy z dwóch stron badanej próbki i ustalamy wysokość impulsu dla materiału bez wad. Przesuwając jednocześnie obie głowice po powierzchniach próbki (zachowując cały czas współosiowość ustawienia głowic) obserwujemy wysokość odbieranego impulsu. Brak wad uwidacznia się na ekranie lampy oscylo-

skopowej niezmienną wysokością impulsu. Zmniejszenie się impulsu świadczy o obecności wady. Zanik impulsu świadczy o całkowitym odbiciu fal ultradźwiękowych od wady tj. o występowaniu bardzo dużej wady.

W przypadku wykrywania wad w złączu spawanym przy pomocy głowicy skośnej ogólne zasady, pozwalające na orientację co do rodzaju wady, są następujące:

- duża amplituda odbitego sygnału: brak przetopu, pęknięcia,
- mała amplituda odbitego sygnału: pęcherze, żuźle.

Przy obrocie głowicy wokół wady wziętej za środek obrotu:

- gwałtowny zanik echa wady świadczy o braku przetopu, względnie o pęknięciu (prostym i długim),
- echo nie zanika przy obrocie w przypadku pęcherzy kulistych,
- echo wykazuje szereg maksimów w przypadku wtrąceń żuźlowych.

D. Opracowanie wyników i sprawozdania

Sprawozdanie z badań powinno zawierać następujące punkty:

- cel badań, opis przedmiotu badań, spis literatury pomocniczej,
- schemat sposobu badania,
- dane dotyczące stosowanej aparatury: częstotliwość i rodzaj fal, kąt załamania, wymiary i rodzaj przetwornika, kąt rozbieżności wiązki, szerokość impulsu, strefa martwa.
- oscylogramy wykrytych wad oraz pomiary głębokości ich zalegania,
- opis wyników badania ze szkicem pokazującym miejsca wadliwe obiektu,
- wnioski odnośnie możliwości i ograniczeń zastosowanej metody oraz skuteczności wykrywania wad metodami ultradźwiękowymi.

Pytania kontrolne

1. Własności fal ultradźwiękowych.
2. Fale podłużne, poprzeczne i powierzchniowe.
3. Rozchodzenie się fal ultradźwiękowych w ciałach stałych: odbicie, załamanie i ugięcie fal.
4. Jak wykorzystujemy zjawisko załamania fali?
5. Od czego zależy akustyczna oporność falowa ośrodka?
6. Zjawisko piezoelektryczne i jego wykorzystanie do wytwarzania fal ultradźwiękowych.
7. Pole dalekie i bliskie.
8. Metody wykrywania nieciągłości materiałów.
9. Budowa i zasada działania defektoskopu ultradźwiękowego.
10. Metoda echa.
11. Ograniczenia metody cienia.

12. Pomiar grubości elementów jednostronnie dostępnych.
13. Jak eliminujemy strefę martwą w metodzie echa?
14. Jakie są zasady doboru głowic ultradźwiękowych?
15. Od czego zależy wykrywalność wad w metodzie echa?
16. Badanie złączy spawanych.

Literatura

1. Filipczyński L., Pawłowski Z., Wehr J. – Ultradźwiękowe metody badań materiałów, WNT, Warszawa 1963
2. Senczyk D. – Defektoskopia i kontrola techniczna. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1976
3. Polska Norma PN-77/M-70055
4. Instrukcja obsługi defektoskopu DUR-20, DI-22 oraz grubościomierza 545H