

45 / 1980

Julian Deputat

SZEROKOŚĆ OBWIEDNI ECH  
REFLEKTORÓW WZORCOWYCH

P. 269



WARSZAWA 1980

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 16 maja 1980 r.

Zarejestrowana pod nr 45/1980



57116

Na prawach rękopisu

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Nakład 140 egz. Ark.wyd.2,3. Ark.druk. 3,5 .  
Oddano do drukarni w listopadzie 1980 r.  
Nr zamówienia 758/0/80

---

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,  
ul.Śniadeckich 8

## SZEROKOŚĆ OBWIEDNI ECH REFLEKTORÓW WZORCOWYCH.

### 1. Wstęp

W ultradźwiękowych badaniach materiałów najstarsza metoda oceny rozmiarów wad polega na wyznaczaniu konturu wady przez określenie obszaru<sup>na</sup> powierzchni przesuwu głowicy, z którego uzyskuje się echo wady. Przy wyznaczaniu konturów dużych, płaskich wad wykorzystuje się zwykle fakt, że amplituda echa wady maleje o  $\Delta W = 6$  decybeli dokładnie w takim położeniu głowicy, w którym połowa wiązki fali ultradźwiękowej pada na powierzchnię wady, a druga połowa przechodzi obok wady. W tym położeniu oś wiązki wskazuje krawędź wady /rys. 1/.

Wymiar wady  $d$  w kierunku osi  $z$  jest równy wielkości przesuwu głowicy  $\Delta Z$  odpowiadającego spadkowi amplitudy echa o 6 dB w stosunku do amplitudy uzyskiwanej w tych położeniach głowicy, w których cała wiązka padała na powierzchnię wady:

$$\Delta Z_{6dB} = d$$

Odległość między skrajnymi położeniami głowicy odpowiadającymi spadkowi amplitudy o więcej niż 6 dB jest większa od rozmiaru wady w kierunku przesuwu. W skrajnym położeniu, przy którym występuje zmniejszenie amplitudy o  $\Delta W > 6$  dB, oś wiązki jest odległa od krawędzi wady o pewną wartość  $b/2$ , którą należy uwzględnić przy ocenie wymiarów wady /rys. 2/.

Odległość  $\Delta Z_{\Delta W}$  może być nazwana szerokością obwiedni echa wady w układzie współrzędnych amplituda-położenie głowicy na osi przesuwu. W tym sensie mówi się o szerokości obwiedni

przy spadku amplitudy echa o 6 dB, czy ogólnie o  $\Delta W$  decybeli. Przy wyznaczaniu rozmiarów wad przez pomiar przesunięcia głowicy korzysta się zwykle z liniowej zależności:

$$d = \Delta Z_{\Delta W} - b_{\Delta W} \quad /1/$$

gdzie  $d$  jest rozmiarem wady w kierunku przesuwu głowicy,  $\Delta Z_{\Delta W}$  - wielkością przesunięcia głowicy, przy którym amplituda echa wady zmienia się od wartości maksymalnej o  $\Delta W$  decybeli,  $b_{\Delta W}$  jest poprawką nazywaną też skuteczną szerokością wiązki.

Nie ma ujednoczonego sposobu wyznaczania poprawek. Dość rozpowszechniony jest zwyczaj doświadczalnego wyznaczania poprawek dla danej głowicy. Niekiedy wyznacza się poprawki z uwzględnieniem odległości głowica-wada. W materiałach szkoleniowych [1] znajduje się informacja "Wartość poprawki  $b_{\Delta W}$  wylicza się teoretycznie, przyjmując, że w krańcowych położeniach głowicy nad wadą znajduje się taka część przetwornika, która odpowiada wartości przyjętego spadku  $\Delta W$  dB. W przypadku przetworników kołowych przy obliczeniach można przyjąć, że jego średnica odpowiada bokowi kwadratu. Popełnia się wówczas błąd nie przekraczający 11%".

Sposób ten prowadzi do prostego wzoru na wartość poprawki "teoretycznej":

$$b_{\Delta W}^{\text{Teoret.}} = 2D \left( 0,5 - 10^{-\frac{\Delta W}{20}} \right) \quad /2/$$

gdzie  $D$  jest średnicą przetwornika.

I tak dla spadku amplitudy  $\Delta W = 6$  dB /czyli dla dwukrotnego spadku amplitudy/, w skrajnych położeniach głowicy nad wadą znajduje się połowa średnicy przetwornika, a więc  $b_{6\text{dB}} = d - d = 0$  i długość wady  $d$  jest równa wartości przesuwu  $\Delta Z_{6\text{dB}}$ . Dla spadku  $\Delta W = 20$  dB /to znaczy dla spadku 10-cio krotnego/, w skrajnych położeniach nad wadą znajduje się 0,1 część średnicy przetwornika, a więc  $b_{20\text{dB}} = 2[0,5 - 0,1]D = 0,8D$ . Opisane przykłady, zaczerpnięte z pracy [1] ilustrują rysunki 3 i 4.

W pracy [1] nie podano żadnych ograniczeń stosowalności prezentowanego tam teoretycznego sposobu obliczania poprawek ani też założeń i drogi, która prowadzi do wzoru (2).

Przy stosowaniu zależności (1) nie czyni się zwykle żadnych zastrzeżeń co do wartości stosunku rozmiaru wady  $d$  do rozmiaru przetwornika  $D$  w kierunku przesuwu, ani co do odległości  $y$  między głowicą i wadą ani też co do kształtu wady.

Wśród kontrolerów ultradźwiękowych panuje przekonanie o ogólnej ważności liniowej zależności między rozmiarem wady i wielkością przesuwu  $\Delta Z_{\Delta w}$ . Tymczasem liniowość zależności /1/ została potwierdzona tylko w stosunku do płaskich wad, których rozmiary liniowe przekraczają rozmiary przekroju poprzecznego wiązki w płaszczyźnie wady /Rys. 1/. Dla wad małych, dla których  $d < D$ , niewiele jest danych o zależności  $\Delta Z_{\Delta w} - d$ . W szczególności brak jest danych o zależności między rozmiarem wady  $d$  w spoinie i wielkością przesuwu  $\Delta Z_{\Delta w}$  głowicy skośnej na fale poprzeczne wzdłuż spoiny.

W roku 1971 Wüstenberg i Mundry [5] opublikowali wyniki modelowych badań związków między wielkością przesuwu głowicy skośnej na fale poprzeczne w kierunku prostopadłym do osi spoiny  $\Delta X_{6dB}$  a średnicą wzorcowych wad cylindrycznych i długością boku wzorcowych wad płaskich w kształcie kwadratu.

Celem pracy [5] było zbadanie możliwości oceny rozmiarów wad w kierunku grubości spoiny /wysokość wady/. Ze względu na odmienną geometrię badania oraz na asymetrię rozkładu ciśnienia w wiązce fal ultradźwiękowych w kierunku pionowym, wyników uzyskanych w pracy [5] nie można bezpośrednio przenieść na przypadek przesuwu głowicy równoległe do osi spoiny. Niektóre wyniki pomiarów Wüstenberga i Mundrego przytoczymy w dalszym ciągu pracy.

W roku 1974 Jočev w swej pracy doktorskiej [6] przedstawił wyniki badania zależności  $\Delta Z_{\Delta w} - d$  dla płaskich

reflektorów kolistych. Badania Jočeva wykonane były techniką zanurzeniową w wodzie przy użyciu głowic normalnych. Według autora, wyniki badań wskazują na brak istotnej zależności między wielkością przesuwu  $\Delta Z_{\Delta w}$  a rozmiarem małych wad kolistych oraz praktycznie brak zależności między  $\Delta Z_{\Delta w}$  dla danej wady wzorcowej a odległością  $y$  między głowicą i wadą.

Dla oceny stopnia utraty żywotności konstrukcji czy części maszyn niezbędna jest znajomość dokładnych wymiarów wad. Błędy w wyznaczeniu wymiarów wad mogą powodować nieprawidłowe oceny przydatności eksploatacyjnej maszyn, urządzeń czy konstrukcji. Dlatego istotny jest każdy krok w kierunku bardziej dokładnego wyznaczania rozmiarów wad. To tłumaczy zainteresowanie możliwością sprecyzowania zakresu stosowności wzoru (1) do wyznaczania liniowych rozmiarów wad i wzoru (2) do wyliczania poprawek.

Za podjęciem badań w tych kierunkach przemawiały następujące przesłanki:

- wraz ze zmniejszaniem się średnicy płaskiego reflektora kołowego rośnie kąt rozbieżności  $\theta$  wiązki fal odbitych od tego reflektora, co powinno prowadzić do wzrostu wartości  $\Delta Z_{\Delta w}$ . Efekt ten mógłby powodować przeszceniwanie rozmiarów wad i ewentualnie błędne przyjmowanie bardzo małych wad punktowych za wady o znacznej długości. Ta przesłanka była powodem zwrócenia w pracy szczególnej uwagi na wady o rozmiarach dużo mniejszych od średnicy przetwornika,
- przy danym rozkładzie amplitud ciśnienia w wiązce fal odbitych od reflektora ze wzrostem odległości  $y$  między głowicą i reflektorem powinna rosnać wartość  $\Delta Z_{\Delta w}$ . W badaniach ultradźwiękowych wykrywa się i ocenia wady przy znacznych różnicach odległości głowica-wada. Znajomość zależności  $\Delta Z = f(y)$  może okazać się istotna dla prawidłowej oceny wadliwości,
- z tych samych powodów należy się spodziewać zależności

wartości poprawki  $b_{\Delta W}$  od odległości i od kształtu zakończenia wady.

Podjęcie badań zależności  $\Delta Z = f(d)$  i  $\Delta Z = f(y)$  stało się szczególnie aktualne wobec narzuconej przez normę PN-77/M-70055 konieczności rozróżniania wad o rozmiarach wzdłuż spoiny mniejszych od rozmiaru przetwornika /wady punktowe/, od wad, których rozmiary wzdłuż spoiny są większe od średnicy przetwornika /wady ciągłe/. Podział ten jest bliski podziałowi wad na "małe" i "duże" z punktu widzenia ocenialności rozmiarów w oparciu o zależność OWR. Norma wprowadza klasyfikację wadliwości złącz spawanych na podstawie wartości względnego ubytku przekroju poprzecznego spoiny spowodowanego przez wady. Każdej wadzie naturalnej przypisuje się wadę równoważną. Za wadę równoważną względem wady naturalnej, której kontury mieszczą się w przekroju poprzecznym wiązki /wada mała/ przyjmuje się idealny kołowy reflektor o współczynniku odbicia 1 i płaskiej powierzchni ustawionej prostopadle do osi wiązki, od którego w tych samych warunkach uzyskuje się echo o takiej samej amplitudzie jak od wady naturalnej. Modelem takiego reflektora jest płaskie dno otworu cylindrycznego zorientowane prostopadle do osi wiązki. Małym wadom naturalnym w spoinach przypisuje się powierzchnię w płaszczyźnie przekroju poprzecznego równą powierzchni równoważnych względem nich idealnych reflektorów kołowych.

Do przyporządkowania wad równoważnych wykrytym małym wadom naturalnym wykorzystuje się znaną zależność OWR /zależność między odległością od głowicy do wady, wzmocnieniem niezbędnym do uzyskania echa wady o wysokości przyjętej za poziom odniesienia i rozmiarem wady równoważnej/. Jako rozmiar wady równoważnej przyjmowana jest jej średnica "d".

Wadom dużym, to jest wadom, których zarysy nie mieszczą się w przekroju poprzecznym wiązki, przypisuje się wady równoważne o konturze w kształcie prostokąta o wymiarach boków równych rozmiarom wady w dwóch prostopadłych

względem siebie kierunkach. Rozmiary liniowe wad wyznacza się właśnie przez pomiar przesunięcia głowicy, przy którym amplituda echa wady zmienia się w ustalonych granicach. Jeśli wada w spoinie jest wąska i długa, tak że jej szerokość jest mniejsza od średnicy wiązki, a długość przekracza rozmiary wiązki, to według zaleceń cytowanej normy należy przyjmować, że wada taka stanowi ubytek przekroju poprzecznego spoiny równy powierzchni prostokąta o wysokości równej średnicy wady równoważnej względem tej wady i długości równej rozmiarowi wady wzdłuż spoiny. Średnicę wady równoważnej wyznacza się za pomocą zależności OWR, a długość przez pomiar przesunięcia głowicy.

Błędna kwalifikacja wady punktowej do grupy wad ciągłych powoduje przypisanie wadzie wielokrotnie większego wkładu w osłabienie złącza i może pociągać za sobą ustalenie nieprawidłowej klasy wadliwości. Podobne skutki mogą powodować błędy pomiaru długości wad ciągłych.

Brak jest kryteriów pozwalających odróżnić wady punktowe od wad ciągłych. Obowiązujące normy nie wypowiadają się na ten temat. Podobnie brak jest ustalonej procedury postępowania przy wyznaczaniu czy obliczaniu poprawek  $b_{\Delta W}$ .

Przemilczenia norm w obydwóch tych sprawach pozwalają na różne, często bezpodstawne interpretacje wskazań otrzymywanych podczas kontroli. Przemilczenia te nie są spowodowane niedopatrzzeniami lecz wynikają z aktualnego stanu wiedzy, z braku wyników odpowiednich badań.

Zwykle zaleca się wyznaczać długość wady korzystając z zależności  $\Delta Z_{6dB} = d$ , /gdy poprawka jest równa zero/.

W praktyce zmiany czułości o 6dB i więcej mogą być związane z lokalnymi zmianami jakości sprzężenia akustycznego.

W takich przypadkach trzeba korzystać z pomiaru przesunięcia przy większym  $\Delta W$  i stosować poprawki.

Rozpowszechniła się praktyka dzielenia wad na punktowe i ciągłe według następującego kryterium:

Jeśli  $\Delta Z_{6dB} \geq D$  wadę uważa się za ciągłą, a gdy  $\Delta Z_{6dB} < D$  wadę przyjmuje się za punktową /D - średnica przetwornika/.



Przy podziale wad na punktowe i ciągłe wykorzystuje się więc liniową zależność  $\Delta z$ - $d$  na granicy jej stosowalności.

W pracy podjęto próbę znalezienia wyrażenia analitycznego wiążącego średnice małych płaskich wad kolistych z wielkością przesuwu  $\Delta Z_{\Delta w}$ . Przedstawiono wyniki pomiarów, ilustrujące główne własności zależności  $\Delta Z_{\Delta w} = f(y, d)$  dla wad o rozmiarach znacznie mniejszych od rozmiarów przetworników piezoelektrycznych głowic ultradźwiękowych. Przedyskutowano także własności poprawek  $b_{\Delta w}$  /wzór 2/ stosowanych przy pomiarze rozmiarów liniowych wad dużych.

## 2. Zależność $\Delta Z_{\Delta w} = f(d, y)$ dla wad małych.

### 2.1. Związki ogólne.

Na rys. 5 pokazano schemat badania i zaznaczono wielkości wykorzystywane w obliczeniach. Głowica zawiera przetwornik piezoelektryczny o rozmiarze  $D$  w kierunku osi przesuwu  $z$ . Płaska wada o rozmiarze  $d$  w kierunku osi  $z$  znajduje się w odległości  $y$  od powierzchni badania. W położeniu I głowicy uzyskuje się echo wady o maksymalnej wysokości. W tym położeniu dokonuje się lokalizacji wady i pomiaru poziomu echa wady.

W położeniach II i III echa wady są o  $\Delta W$  decybeli mniejsze w porównaniu z echem uzyskiwanym w położeniu I.

Rozpatrzmy przypadek wad o rozmiarach znacznie mniejszych od rozmiarów przekroju poprzecznego wiązki w odległości  $y$ .

Założymy także, że rozmiary liniowe wady są większe od długości fali oraz że odległość  $y$  od głowicy do wady jest większa od trzech długości pola bliskiego  $N$  głowicy  $/y > 3N/$ .

To ostatnie założenie oznacza, że wada znajduje się w tej części pola ultradźwiękowego, w której rozchodzą się fale kuliste. Przy poprzednio przyjętym warunku  $d < D$  możemy uważać, że ciśnienie fali padającej jest jednakowe na całej powierzchni wady.

Przy tych założeniach obliczymy wartość przesuwu głowicy  $\Delta Z$ , przy którym amplituda echa wady zmienia się o  $\Delta W$  dB od wartości maksymalnej.

W położeniach głowicy w lewo i w prawo od położenia I kąt między osią wiązki fal wysyłanych do materiału i kierunkiem od środka głowicy do środka powierzchni wady idealnej wynosi  $\theta_{\Delta W}$ .

Jeśli rozkład ciśnienia akustycznego w polu dalekim głowicy będzie określony funkcją  $R_g(\theta)$ , to w przypadku pracy metodą echa kierunkowa charakterystyka czułości tej głowicy jest kwadratem funkcji opisującej rozkład ciśnienia w polu fal wysyłanych przez głowicę. Wynika to z faktu, że rozkład kierunkowy własności emisyjnych przetwornika jest taki sam jak rozkład kierunkowy czułości, gdy przetwornik pracuje jako odbiornik [7].

Kierunkowy rozkład ciśnienia w polu akustycznym fal odbitych od wady będzie oczywiście inny niż w polu wysłanym przez głowicę. Oznaczmy charakterystykę kierunkowości pola fal odbitych od wady przez  $R_w / \theta /$ .

Dla przetworników kołowych i kołowych reflektorów kierunkowy rozkład amplitud ciśnienia w polu dalekim opisuje funkcja:

$$R_o = \frac{-2J(x)}{x} \quad /3/$$

gdzie:  $x = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta$ ,  $J/x/$  jest funkcją Bessela pierwszego rzędu,  $D$  - jest średnicą przetwornika albo reflektora kołowego,  $\lambda$  - długością fali zaś  $\theta$  kątem między osią wiązki i rozpatrywanym kierunkiem.

Dla przetworników i reflektorów kwadratowych o boku  $D$  charakterystyka kierunkowości dana jest wzorem:

$$R_o = \frac{\sin x}{x} \quad /4/$$

gdzie:  $x = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta$

Dla przetworników i reflektorów prostokątnych charakterystyki kierunkowości nie są osiowo symetryczne.

Kierunkowy rozkład ciśnienia w polu dalekim przetwornika prostokątnego opisuje wyrażenie:

$$R(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sin x_1}{x_1} \cdot \frac{\sin x_2}{x_2} \quad /5/$$

gdzie:  $x_1 = \frac{\pi D_1}{\lambda} \sin \theta_1$  ;  $x_2 = \frac{\pi D_2}{\lambda} \sin \theta_2$   $D_1$  i  $D_2$

są długościami boków prostokąta.

W odległości  $y > 3\lambda$  ciśnienie akustyczne na osi wiązki  $P_{\max}(y)$  fal wysłanych przez głowicę jest wprost proporcjonalne do ciśnienia  $P_0$  wytwarzanego w badanym materiale tuż przy powierzchni przetwornika ( $y = 0$ ) i do powierzchni przetwornika, a odwrotnie proporcjonalne do długości fali  $\lambda$  i odległości  $y$ . W materiale o współczynniku tłumienia  $\alpha$  gdy głowica ma kołowy przetwornik piezoelektryczny, otrzymamy:

$$P_{\max}(y) = P_0 \frac{\pi D^2}{4\lambda y} e^{-\alpha y} \quad /6/$$

W ogólnym przypadku płaskiego przetwornika:

$$P_{\max}(y) \sim \frac{1}{y}$$

W punkcie odległym o „z” od osi „y” ciśnienie akustyczne ma wartość

$$P_g(y, z) = P_{\max}(y) R(\theta) = P_p \frac{\pi D^2}{4\lambda y} R(\theta) e^{-\alpha y} \quad /7/$$

Wzór /7/ przedstawia wartość ciśnienia akustycznego fali padającej na wadę. Jeśli założymy, że współczynnik odbicia od wady ma wartość 1, to wzór /7/ przedstawia jednocześnie wartość ciśnienia początkowego w wiązce fal odbitych od wady.

Rozkład ciśnienia w wiązce fal odbitych  $P_w(y, z)$  otrzymamy mnożąc wyrażenie /7/ przez charakterystykę kierunkowości pola fal odbitych od wady  $R_w(\theta)$  :

$$P_w(y, z) = P_{\max}(y) \cdot R_g(\theta) \cdot R_w(\theta) \quad /8/$$

Dla uzyskania wyrażenia na amplitudę echa wady  $h_w$  odebranego przez głowicę należy wyrażenie /8/ pomnożyć przez charakterystykę kierunkowości głowicy  $R_g(\theta)$ .

Wyrażenie na wysokość echa wady  $h_w$  na ekranie lampy oscyloskopowej aparatu ultradźwiękowego będzie miało postać:

$$h_w = AP_0 \frac{\pi D^2}{4\lambda y} R^2(\theta) R_w(\theta) e^{-2\alpha y} f(y). \quad /9/$$

gdzie A jest stałą uwzględniającą czułość układu odbiorczego zaś  $f(y)$  funkcją opisującą zmiany ciśnienia na osi wiązki odbitej w funkcji odległości y.

Postać tej funkcji zależy od kształtu powierzchni reflektora i dla małych płaskich reflektorów ciśnienie na osi w polu dalekim wiązki maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości:

$$f(y) = y^{-1} \quad /10/$$

Amplituda echa wady ma wartość największą dla  $\theta = 0$ .

Dla wyznaczenia położenia „z” głowicy, w którym amplituda echa jest o  $\Delta W$  dB mniejsza od wartości maksymalnej należy obliczyć wartość kąta  $\theta_{\Delta W}$ . Wartość przesunięcia  $\Delta Z_{\Delta W}$  wyliczymy z geometrycznej zależności:

$$\Delta Z_{\Delta W} = 2 Z_{\Delta W} = 2y \operatorname{tg} \theta_{\Delta W} \quad /11/$$

Porównując amplitudy echa wady dla  $\theta = \theta_{\Delta W}$  i  $\theta = 0$  otrzymamy;

$$\frac{h_w(z)}{h_{w\max}} = \frac{AP_0 \frac{\pi D^2}{4\lambda y} R_g^2(\theta_{\Delta W}) R_w(\theta_{\Delta W}) y^{-2} e^{-2\alpha y}}{AP_0 \frac{\pi D^2}{4\lambda y} R_g^2(0) R_w(0) y^{-1} e^{-2\alpha y}} = 10^{-\frac{\Delta W}{20}} \quad /12/$$

Przyjmijmy dla rozważanych przetworników i wad  $R_g(\theta) = 1$ ;  $R_w(0) = 1$ .

Otrzymamy:

$$10^{-\frac{\Delta W}{20}} = R_g^2 (\theta_{\Delta W}) R_w (\theta_{\Delta W}) \quad /13/$$

Równania /11/ i /13/ pozwalają wyznaczyć wartości przeaun-  
nięcia  $\Delta Z_{\Delta W}$ . Dla poszczególnych kształtów przetworników i  
wad należy wstawić do wzoru /12/ funkcje przedstawiające  
odpowiednie charakterystyki kierunkowości.

## 2.2. Analityczne postacie charakterystyk kierunkowości.

Dla uzyskania wyrażenia na  $\Delta Z_{\Delta W}$  w prostej postaci  
analitycznej będziemy operowali przybliżonymi wyrażeniami  
opisującymi charakterystyki kierunkowości.

Dla przetwornika kwadratowego przyjmijmy przybliżenie:

$$R_{\square}(\theta) = \frac{\sin x}{x} = 1 - \frac{x^2}{6}$$

$$x = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta \quad /14/$$

Dla przetwornika /i reflektora/ kolistego posłużymy się  
przybliżeniem uzyskanym przez zastąpienie rozkładu ciśnie-  
nia akustycznego wzdłuż osi,  $z$  w odległości,  $y$  opisywanego  
przez wzór:

$$p(y, z) = P_{\max}(y) \frac{2J(x)}{x} \quad /15/$$

rozkładem trójkątnym. Zasadę przybliżenia pokazano na  
rys. 6.

Krzywą dzwonową zastępujemy trójkątem o wysokości  $p_{\max}/y/$   
i podstawie odpowiadającej średnicy wiązki w odległości  $y$   
dla spadku ciśnienia do zera. Oczywiście  $\sin \theta_0 = 1,22\lambda/D$ .  
Korzystając z proporcji:

$$\frac{P_{\Delta W}}{P_{\max}} = \frac{OB}{OA} = \frac{y \tan \theta_{\Delta W}}{y \tan \theta_0} \quad /16/$$

możemy napisać przybliżoną charakterystykę kierunkowości:

$$R_0(\theta) = 1 - \frac{\operatorname{tg} \theta_{\Delta W}}{\operatorname{tg} \theta_0} = 1 - \frac{z}{y \operatorname{tg} \theta_0} \quad /17/$$

Przybliżenie /17/ powoduje zaniżenie wartości przesuwu  $\Delta Z_{\Delta W}$ .

### 2.3. Obliczenie wartości $\Delta Z_{\Delta W}$ dla wad małych.

Posługując się pojęciem wady równoważnej względem wady naturalnej wyprowadzimy zależności wiążące średnicę wad równoważnych,  $d$  z wielkością przesuwu głowicy  $\Delta Z$ , przy którym obserwuje się zmianę amplitudy echa wady o  $\Delta W$  decybeli. Rozpatrzmy najczęściej spotykany przy badaniu złącz spawanych przypadek głowicy zawierającej przetwornik kwadratowy.

Przyjmując wyrażenie na charakterystykę kierunkowości przetwornika kwadratowego w postaci /14/, charakterystykę kierunkowości reflektora kolistego w postaci /17/, prawa zmian amplitud ciśnienia na osi przetwornika i wady odpowiednio według wzorów /6/ i /10/ stosunek amplitud ech wady w położeniach  $z = 0$  / $h = h_{\max}$ / i  $z = Z_{\Delta W}$  /amplituda echa mniejsza o  $\Delta W_{\text{dB}}$  /wyrazi się zgodnie z wzorem /12/:

$$\frac{h(Z_{\Delta W})}{h_{\max}} = 10^{-\frac{\Delta W}{20}} = \left(1 - \frac{1}{6} \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2} \sin^2 \theta\right) \left(1 - \frac{z}{y \operatorname{tg} \theta_0}\right) \quad /18/$$

Zakładając  $h_{\max} = 1$  oraz wyrażając  $\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{\sin \theta_0}{\cos \theta_0} =$

$\frac{1,22 \lambda / d}{1 - (1,22 \lambda / d)^2}$ , po pominięciu członów zawierających

$\sin \theta_0$  w potęgze wyższej niż druga otrzymamy równanie:

$$B \sin^2 \theta + \sqrt{\frac{1}{A^2}} - 1 \sin \theta + \left(10^{-\frac{\Delta W}{20}} - 1\right) = 0 \quad /19/$$

gdzie:  $A = 1,22 \lambda / d$  i  $B = \frac{1}{3} \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2}$

Z równania /19/ obliczamy wartość  $\sin \Theta$ , a uwzględniając /11/ z przybliżeniem  $\sin \Theta = \operatorname{tg} \Theta$  otrzymamy na  $\Delta Z$  odpowiadające danemu  $\Delta W$  wyrażenie:

$$\Delta Z_{\Delta W} = \frac{3\lambda^2}{\pi^2 D^2} y \left\{ \left[ (1,22\lambda/d)^2 + \frac{4}{3} \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2} \left( 1 - 10^{-\frac{\Delta W}{20}} \right) - 1 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[ (1,22\lambda/d)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad /20/$$

Przyjmując we wzorze (20)  $\Delta W = 6$  dB i  $\Delta W = 20$  dB, otrzymamy wyrażenie na  $\Delta Z_{6\text{dB}}$ ;  $\Delta Z_{20\text{dB}}$ :

$$\Delta Z_{6\text{dB}} = \frac{3\lambda^2}{\pi^2 D^2} y \left\{ \left[ (1,22\lambda/d)^2 + \frac{2}{3} \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[ (1,22\lambda/d)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad /21/$$

$$\Delta Z_{20\text{dB}} = \frac{3\lambda^2}{\pi^2 D^2} y \left\{ \left[ (1,22\lambda/d)^2 + 1,2 \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[ (1,22\lambda/d)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad /22/$$

Dzieląc obydwie strony zależności (22) przez  $D$  i pomijając składniki  $1/D^2$  otrzymamy unormowaną zależność:

$$\frac{\Delta Z_{6\text{dB}}}{D} = 0,076 A \left( \sqrt{0,67 R^2 + 6,58 - 0,82R} \right) \quad /23/$$

Podobnie ze wzoru /20/:

$$\frac{\Delta Z_{\Delta W}}{D} = 0,076 A \left( \sqrt{0,67 R^2 + 13,15 \left( 1 - 10^{-\frac{\Delta W}{20}} \right) - 0,82R} \right) \quad /24/$$

gdzie  $A = y/N$  i  $R = d/D$  są odpowiednio unormowaną odległością i unormowanym rozmiarem wady.

W podobny sposób można uzyskać wyrażenie na wielkość przesuwu w przypadku innych kształtów przetworników i wad.

Ze wzoru /20/ widać, że wartość przesunięcia  $\Delta Z$  jest wprost proporcjonalna do odległości  $y$  i zależy od stosunku

długości fali do średnicy wady i do boku przetwornika oraz od przyjętej wartości  $\Delta W$ . O ostrości zależności  $\Delta Z$ -y decyduje kwadrat stosunku długości fali do średnicy przetwornika.

W tabeli I pokazano przykładowo wyliczone według wzorów /21/ i /22/ wartości  $\Delta Z$  przy  $\Delta W = 6$  dB i 20 dB dla wad kołowych o średnicach  $d = 2; 3; 4$  i 6 mm znajdujących się w stali w odległościach 60 mm, 120 mm, 240 mm i 300 mm od głowicy skośnej na fale poprzeczne o częstotliwości 4 MHz, posiadającej przetwornik kwadratowy o boku 7 mm.

Tabela I. Wartości  $\Delta Z_{6dB}$  i  $\Delta Z_{20dB}$  dla kilku płaskich wad kołowych w stali. Głowica 4T70<sup>0</sup>7x7c:

średnica wady d [mm]	y = 60 mm		y = 120 mm		y = 240 mm		y = 300 mm	
	Z <sub>6dB</sub>	Z <sub>20dB</sub>	Z <sub>6dB</sub>	Z <sub>20dB</sub>	Z <sub>6dB</sub>	Z <sub>20dB</sub>	Z <sub>6dB</sub>	Z <sub>20dB</sub>
2	4,94	6,76	9,88	13,52	19,76	27,04	24,7	33,8
3	4,68	6,50	9,36	13,00	18,72	26,0	23,4	32,5
4	4,48	6,28	8,96	12,56	17,92	25,12	22,4	31,4
6	4,08	5,86	8,16	11,72	16,32	23,44	20,4	29,3

Dane z tabeli I wskazują na nieznaczne malenie wielkości przesuwu  $\Delta Z$  ze wzrostem średnicy  $d$  wady kołowej, co jest zgodne z intuicyjnym przewidywaniem. Przyrost  $\Delta Z$  związany ze zmianą  $\Delta W$  z 6 dB na 20 dB rośnie ze wzrostem średnicy wady i dla średnicy  $d = 2$  mm wynosi 37%, a dla  $d = 6$  mm wynosi 43%. Gdy średnica wady jest znacznie mniejsza od  $D$ , wartości  $\Delta Z$  są większe od średnicy wady i ze wzrostem średnicy wady różnica  $\Delta Z - d$  maleje.



Korzystając z przybliżonego wzoru /21/ można wyliczyć dla każdej głowicy graniczną wartość odległości  $y$ , poniżej której  $\Delta Z_{6dB}$  wad równoważnych większych od wybranej wady progowej nie będzie większe od boku przetwornika  $D$ . W tabeli II podano wyliczone wartości granicznych odległości głowica-wada w stali, poniżej których  $\Delta Z_{6dB}$  dla wad równoważnych o średnicy  $d \geq 2$  mm nie są większe od boku przetwornika użytej głowicy. Oczywiście, podobne kryterium można znaleźć dla przypadku korzystania przy ocenie wad z pomiarów szerokości obwiedni przy innych wartościach  $\Delta W$ .

Tabela II. Graniczne wartości odległości  $y_{gr}$  głowica-wada, poniżej których  $\Delta Z_{6dB}$  jest mniejsze od boku przetwornika  $D$ . Wada progowa  $d = 2$  mm.

Głowica	$D$ [mm]	$N$ [mm]	$y_{gr}$ [mm]	$A = \frac{y}{N}$
4T70 <sup>0</sup> A7	7	20	85	4,1
4T70 <sup>0</sup> 10C	10	40	169	4,2
4T70 <sup>0</sup> 18C	18	130	535	4,1
2T70 <sup>0</sup> 10C	10	20	81	4,0
2T70 <sup>0</sup> 18C	18	63	261	4,1

Jak widać z tabeli, graniczne wartości odległości dla głowic stosowanych w tej pracy zawarte są w przedziale od 81 mm do 535 mm. Jeśli odległość wyrazimy w krotnościach długości pola bliskiego  $A = y/N$ , to dla wszystkich używanych głowic otrzymamy na graniczną odległość głowica-wada wartość bliską  $4N$ , gdzie  $N$  jest długością pola bliskiego głowicy.

Założenie stałości ciśnienia akustycznego na całej powierzchni wady ogranicza zastosowanie uzyskanych wyników tylko do wad o rozmiarach znacznie mniejszych od średnicy przetwornika. Przy wzroście średnicy wady założenie to

jest w coraz mniejszym stopniu spełnione, co wpływa na zmianę charakterystyki wiązki odbitej od wady. Przy nierównomiernym rozkładzie ciśnienia fali padającej na powierzchnię wady wiązka fal odbitych jest bardziej rozbieżna w porównaniu z przypadkiem jednakowego ciśnienia na całej powierzchni. Efekt ten prowadzi do wzrostu wartości  $\Delta Z$  dla wad, których rozmiary zbliżają się do rozmiarów przekroju poprzecznego wiązki.

Naturalnie, przy dalszym wzroście rozmiaru wady w kierunku przesuwu głowicy, wartość  $\Delta Z$  będzie narastać proporcjonalnie do rozmiaru wady, tak jak to przedstawia zależność (1). Przebieg zmian wartości  $\Delta Z_{\Delta W}$  w zależności od rozmiaru wady  $d$  będzie miał kształt pokazany schematycznie na wykresie na rys. 7.

Pod wykresem na rys. 7 pokazane są schematycznie obwiednie kołowych wad idealnych o narastających średnicach. Jak widać, gdy średnica wady osiąga wartość większą od szerokości wiązki w płaszczyźnie wady na obwiedni zaczyna się pojawiać spłaszczenie szczytu i dla rozmiarów wady znacznie przekraczających szerokość wiązki plateau obwiedni staje się wyraźne.

W następnym paragrafie rozpatrzmy zależność (1) dla przypadku wad o rozmiarach w kierunku przesuwu większych od rozmiarów przekroju poprzecznego wiązki fal ultradźwiękowych.

### 3. Poprawki $b_{\Delta W}$ dla wad dużych.

Na rys. 8 pokazano szkic geometrii badania i wskazania wady podczas przesuwu głowicy.

W skrajnym położeniu II w powstawaniu echa wady biorą udział fale odbite od brzegowych obszarów powierzchni i od krawędzi wady. Nie udało się uzyskać analitycznego wyrażenia amplitudy echa  $H_{II}$  z uwzględnieniem dyfrakcji fal. Jednakże analiza schematu pokazanego na rys. 8 prowadzi do ważnych wniosków. Będziemy rozpatrywać przypadek wady w polu

dalekim jako najczęstszy w praktyce. Gdy głowica znajduje się w położeniu I, w płaszczyźnie rysunku następuje odbicie zwierciadlane. W położeniu II amplituda echa wady będzie o  $\Delta W$  dB mniejsza.

Wysokości ech  $h_I$  i  $h_{II}$  w tych położeniach można zapisać:

$$h_I \sim p(y) \cdot P_w(y) \quad /25/$$

$$h_{II} \sim R_g^2(\theta_{\Delta W}) \cdot R_w^2(\theta_{\Delta W}) \cdot$$

$$p(y) \cdot P_w(y)$$

gdzie  $R_g$  i  $R_w$  są charakterystykami kierunkowości głowicy i wady,  $p/y/$  i  $p_w/y/$  prawami zmian ciśnienia na osi wiązki w funkcji odległości w polu dalekim wypromieniowanym odpowiednio z głowicy i odbitym od wady.

Wady naturalne mają zakończenia o bardzo różnej konfiguracji. Rozpatrzmy dwa modele odpowiadające idealnym wadom, których zakończenia mogą być traktowane w jednym przypadku jako reflektor liniowy, a w drugim jak mała wada płaska /rys. 8b/. Ciśnienie fali odbitej od reflektora liniowego maleje odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z odległości:

$$P_w(y) \sim 1/\sqrt{y}$$

Po odbiciu od wady małej w polu dalekim wiązki odbitej ciśnienie maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości /wzór 10/.

W zależności od kształtu i rozmiarów wady i zakończenia wady w kierunku przesuwu otrzymamy różne wyrażenia na stosunek amplitud ech w położeniach I i II. Na przykład:

a/ Duża wada płaska. Zakończenie krawędzią liniową:

$$\frac{h_{II}}{h_I} = \frac{1}{\sqrt{y}} R_g^2(\theta_{\Delta W}) R_w^2(\theta_{\Delta W}) \quad /27/$$

b/ Duża wada płaska. Zakończenie wąskie /rys. 2b/:

$$\frac{h_{II}}{h_I} = \frac{1}{y} R_G^2 (\Theta_{\Delta W}) R_W^2 (\Theta_{\Delta W}) \quad /28/$$

Z zależności /27/ i /28/ można wyznaczyć wartość kąta  $\Theta$  odpowiadającego danemu  $\Delta W$ . Między wartością poprawki  $b_{\Delta W}$ , a odległością do wady  $y$  i kątem  $\Theta_{\Delta W}$  zachodzi związek:

$$b_{\Delta W} = 2y \operatorname{tg} \Theta_{\Delta W} \quad /29/$$

Zakładając kształt przetwornika i wady i przyjmując odpowiednie charakterystyki kierunkowości można wyliczyć wartości poprawek. Maksymalna wartość poprawki nie może oczywiście przekroczyć szerokości wiązki przy spadku amplitudy ciśnienia do zera. Z przytoczonych rozważań wynikają następujące wnioski:

- Ostrość zależności poprawki od odległości zależy od rozmiarów zakończenia wady w stosunku do rozmiarów wiązki i od kształtu zakończenia.
- Wartość poprawki  $b_{\Delta W}$  jest proporcjonalna do odległości od wady i zależy od charakterystyk kierunkowości głowicy /długość fali, średnica przetwornika/ i brzegu wady.

#### 4. Badania doświadczalne i dyskusja wyników.

##### 4.1. Próbkki i sposób badania.

Podstawowe wnioski wynikające z wyprowadzonego przybliżonego wyrażenia /20/ sprawdzono doświadczalnie. Ze względu na powszechność ręcznych badań, dla uzyskania wyników o większej praktycznej wymowie wszystkie pomiary wykonano przy ręcznym prowadzeniu głowicy.

W przypadku wad punktowych badania wykonano na próbkach stalowych zawierających wady wzorcowe w postaci otworów płaskodennych o średnicach od 2 do 12,5 mm /rys. 9/. Stosowano głowice skośne na fale poprzeczne

o częstotliwościach 2 i 4 MHz i kącie załamania  $70^{\circ}$ , produkowane przez UNIPAN i INCO.

Przetworniki głowic miały kształt kwadratów o bokach 7, 10 i 18 mm. Zmianę odległości między głowicą i wadą dla próbki o danej grubości uzyskiwano przez wprowadzenie fal kolejno z położeń głowicy I, II i III. Dla każdego przypadku znajdowano położenie głowicy, w którym uzyskuje się echo wady wzorcowej o największej wysokości i następnie przesuwano głowicę w lewo i w prawo do położeń, w których amplituda echa wady malała do wartości o  $\Delta W$  decybeli mniejszej od wartości maksymalnej. Dla zapewnienia równoległości toru przesuwu głowicy do czoła wady wzorcowej płaskie czoło głowicy prowadzono wzdłuż krawędzi precyzyjnie ustawionego pręta przymocowanego do powierzchni próbki. Wartości  $\Delta Z$  odczytywano z dokładnością do 1 mm. Pomiary wykonywane były kilkakrotnie przez trzech operatorów. Na wykresach zaznaczono granice uzyskiwanego rozrzutu wyników.

Oprócz pomiarów  $\Delta Z$  dla danego  $\Delta W$  wykonano także pomiary  $\Delta Z$  dla wad o różnych średnicach przy stałej czułości układu defektoskop-głowica. W tych pomiarach wartości  $\Delta W$  dla każdej wady wzorcowej były inne i zmieniały się proporcjonalnie do powierzchni wady.

Wykonano także pomiary wartości  $\Delta Z$  dla danego  $\Delta W$  przy ręcznym prowadzeniu głowicy bez pomocy prowadnicy ustalającej tor przesuwu głowicy. Te ostatnie pomiary miały na celu sprawdzenie ewentualnego wpływu na mierzoną wartość przesuwu głowicy  $\Delta Z$  naturalnej tendencji operatorów prowadzących ręczną kontrolę ultradźwiękową do prowadzenia głowicy po takim torze, z którego uzyskuje się echo wady o największej wysokości. Zmierzone w ten sposób wartości  $\Delta Z$  były od 20 do 40% wyższe od wartości otrzymanych przy przesuwie po torze prostoliniowym równoległym do czoła wady.

Poprawki  $b_{\Delta W}$  wyznaczano na wykonanych w próbkach stalowych modelach wad dużych zakończonych ostrą liniową krawędzią, wad dużych zakończonych wąskim cyplem o rozmiarach znacznie

mniejszych od przekroju wiązki i wad pasmowych imitujących wady ciągle w spoinach.

#### 4.2. Zależność $\Delta Z_{\Delta W} = f(d, y)$ dla wad małych.

Przykładowe wyniki pomiarów zależności wartości przesuwu - średnica wady wzorcowej przy danym  $\Delta W$  oraz wartości przesuwu - odległość dla danej wady wzorcowej pokazano na wykresach rys. 10 i 11. Obydwa rysunki przedstawiają wyniki uzyskane za pomocą tej samej głowicy 4T70A7. Długość pola bliskiego tej głowicy wynosi  $N = 20$  mm.

Na rys. 10 pokazano zależność między  $\Delta Z_{6dB}$  i średnicą  $d$  czterech wad wzorcowych wykonanych w płycie o grubości 40 mm. Pomiary prowadzono przy odległościach głowica-wada wynoszących około 50 mm /2,5N/, 170 mm /8,5N/ i 290 mm /14,5N/. Linia przerywana prowadzona pod kątem  $45^\circ$  do osi wykresu wskazuje kierunek, do którego powinny dążyć wartości  $\Delta Z_{6dB}$  gdy średnica wady przekracza długość boku przetwornika. Linie ciągłe przedstawiają przebiegi zależności  $\Delta Z_{6dB} = f(d)$  obliczone według wzoru /21/. Dla odległości  $y = 50$  mm wyniki pomiarów mają wartości nieco większe od obliczonych, dla  $y = 170$  mm przebieg obliczony wchodzi w zakres pola rozrzutu wyników pomiarów, zaś dla  $y = 290$  mm krzywa teoretyczna przebiega nieco powyżej średnich wartości uzyskanych z pomiarów.

Jak widać z wykresu wartości  $\Delta Z_{6dB} < D$  uzyskuje się tylko dla wad o średnicach  $d = 3, 4$  i  $5,5$  mm i tylko z odległości 50 mm /2,5N/. Przy kolejnej większej odległości głowica-wada dla wszystkich wad wartości  $\Delta Z_{6dB}$  są większe od średnicy przetwornika.

Ze wzrostem średnicy wady wartość  $\Delta Z$  początkowo maleje. Wzrost odległości głowica-wada powoduje wzrost wartości  $\Delta Z$ . Liniowość zależności  $\Delta Z$ -y ilustruje wykres na rys. 11. Na wykresie tym przedstawiono dane dla wady wzorcowej o średnicy 3 mm uzyskane przy stosowaniu głowic 4T70A7 ( $\lambda/D = 0,11$ ) i 4T7018<sub>C</sub> ( $\lambda/D = 0,044$ ).

Linie ciągłe odpowiadają przebiegom obliczonym.

Zgodnie z przewidywaniami mniejsze nachylenie ma prosta odpowiadająca danym dla głowicy 4T70<sup>0</sup>18C. Podobne wyniki uzyskano również dla wad wzorcowych o innych średnicach przy stosowaniu głowic 4T70<sup>0</sup>10C, 2T70<sup>0</sup>10C i 2T70<sup>0</sup>18C. Zależność kąta nachylenia prostej  $\Delta Z = f / y /$  od wartości  $\lambda^2/D^2$  wyjaśnia dlaczego w pracy [6] nie zauważono istotnego wpływu odległości na wartość  $\Delta Z$ .

Dla stosowanych w tej pracy głowic normalnych %L038C, %,5L025C i 2L013C stosunki  $\lambda/D$  mają wartości 0,019; 0,024 i 0,057.

W dwóch pierwszych przypadkach zależność od odległości jest istotnie słaba i doświadczalnie nie stwierdzono uporządkowanej zależności od odległości. Dla głowicy 2L013C  $\lambda/D = 0,057/$  widać jednak uporządkowaną, rosnącą zależność  $\Delta Z$  od odległości dla wad małych /rys. 22 str.48 pracy [6]/.

Na rys. 12 przedstawiono wyniki uzyskane przy użyciu głowicy o 2T70<sup>0</sup>10C / N = 20 mm /, zaś na rys. 13 wyniki uzyskane za pomocą głowicy 4T70<sup>0</sup>18C / N = 115 mm /. Na osi poziomej odłożono unormowany rozmiar wady  $d/D$ , a na osi pionowej unormowane przesunięcie  $\Delta Z_{6dB}/D$ .

Na rysunkach tych przedstawiono dane otrzymane dla głowic o najmniejszej i największej długości pola bliskiego.

W przypadku głowicy 2T70<sup>0</sup>10C odległości głowica-wada mieściły się w zakresie od 1N do 14,5N, zaś dla głowicy 4T70<sup>0</sup>18C odległości zawarte były od 0,17 N do 2,6 N. Spełnione są wymagania kryterium granicznej wartości odległości /tabela II /.

Z rysunku 12 widać, że dla  $y \leq 3,7N$  wartości  $\Delta Z_{6dB}$  małych wad o średnicy  $d > 2$  mm są mniejsze od D. Podobnie dla głowicy 4T70<sup>0</sup>18C wszystkie wartości  $\Delta Z_{6dB} \ll D$  odpowiadają wadom o rozmiarach  $d \ll D$ .

Z rysunku 13 widać także, że dla odległości głowica-wada  $y < N$  wartości  $\Delta Z_{6dB}$  wcale nie narastają ze wzrostem odległości.

W przypadku głowicy 4T70<sup>0</sup>18C obserwuje się nawet zależność przeciwną - wraz ze zmniejszeniem się odległości od 0,65N do 0,17N wartości  $\Delta Z_{6dB}$  narastają. Dopiero dla  $y > 0,65N$  występuje wzrost wartości  $\Delta Z_{6dB}$  ze wzrostem odległości  $y$ . Badania wykonane w ramach tej pracy nie pozwalają na stwierdzenie, czy ta ostatnia zależność jest prawidłowością ogólną.

### 4.3. Pomiary przy stałej czułości.

Wykres na rys. 14 przedstawia przykład zależności między wielkością przesuwu  $\Delta Z$ , przy którym amplitudy echa wady pozostają powyżej stałego progu, a rozmiarem wady  $d$ .

W tym przypadku pomiary wykonano za pomocą głowicy 4T70<sup>0</sup>10C przy odległości głowica-wada  $y = 75 \text{ mm} / 1,8N$ . Mierzono długość odcinków przesuwu  $\Delta Z$ , na których amplituda echa wady badanej była wyższa od amplitudy uzyskanego z odległości 75 mm echa wady wzorcowej o średnicy  $d = 2 \text{ mm}$ . Wartość  $\Delta Z$  dla wady, której poziom echa przyjęto za próg rejestrowalności wynosi oczywiście zero. Amplitudy ech wad o rosnących średnicach przekraczają próg rejestrowalności o coraz większą wartość. Z wykresu widać ostrą i jednoznaczną zależność wartości  $\Delta Z$  od średnicy wady. Taki przebieg funkcji  $\Delta Z/d$  pozwala na ocenę rozmiarów wad w kierunku przesuwu, jeśli odległość głowica-wada pozostaje stała.

Na rys. 15 zestawiono zależności  $\Delta Z/D$  względem  $d/D$  uzyskane przy progu rejestrowalności określonych amplitudą echa wady o rozmiarze unormowanym  $d/D = 0,2$ , dla głowic 4T7010C i 2T7010C z tej samej odległości głowica-wada  $y = 75 \text{ mm}$ . Dla głowicy 2T7010C ( $N = 20 \text{ mm}$ ) wartości  $\Delta Z$  leżą wyżej od odpowiednich wartości uzyskanych przy badaniu za pomocą głowicy 4T7010C ( $N = 40 \text{ mm}$ ).

W przypadku pierwszej głowicy odległość głowica-wada wyrażona w krotności długości pola bliskiego jest dwa razy większa.



Na rysunku 16 pokazano podobne przebiegi uzyskane przy badaniu głowicami 2T70<sup>0</sup>18C i 4T70<sup>0</sup>18C. W tym przypadku próg rejestrowalności przesuwu wyznaczała amplituda echa wady o rozmiarze  $d/D = 0,11$ . Dla tych głowic odległość do wady  $y=75$  mm wyrażona w krotności  $N$  wynosiła odpowiednio 1,1 i 0,55. Jak w poprzednim przykładzie widać wzrost wartości  $\Delta Z$  przy zwiększaniu się odległości do wady. Narastanie odległości od głowicy do wady przy tym samym progu rejestrowalności przesunięcia głowicy powoduje malenie wartości  $\Delta Z$ . Decyduje o tym szybki spadek amplitudy echa wady wynikający zarówno z rozbieżności wiązki jak i na skutek tłumienia. Dla praktycznego wykorzystania zależności  $\Delta Z - d$  przy stałym progu rejestrowalności przesunięcia trzeba dysponować odpowiednimi zależnościami dla różnych odległości głowica-wada. Pewne możliwości ułatwienia zastosowań pomiarów  $\Delta Z$  przy stałej czułości badania do oceny rozmiarów wad małych wykrywanych z różnych odległości można upatrywać w przyjęciu progu rejestrowalności  $\Delta Z$  w postaci krzywych na ekranie lampy oscyloskopowej defektoskopu o wysokości odpowiednio malejącej z odległością. Przebieg takich krzywych progowych powinien uwzględnić zarówno straty amplitudy fali związane z rozbieżnością i z tłumieniem jak również geometryczną zależność  $\Delta Z$  od odległości /wzór 11/.

#### 5. Próby oceny wysokości wad.

Wüstenberg i Mundry [5] prowadzili badania zależności przesuwu głowicy  $\Delta W=6\text{dB}$  od średnicy wad wzorcowych w postaci otworów poziomych /wady cylindryczne/ i boku płaskodennych otworów kwadratowych /wady płaskie/. Schematy układów pomiarowych pokazano na rys.17. Autorzy interesowali się możliwością oceny rozmiaru wad w kierunku grubości spoiny i z tego względu mierzyli tylko długości przesuwu głowicy w kierunku rzutów wad na powierzchnię przesuwu. Kierunek ten przy badaniu złącz spawanych odpowiada kierunkowi  $x$  prostopadłemu do osi spoiny. Dlatego można tu mówić o przesuwie  $\Delta X_{6\text{dB}}$ .

Z badanych przez Wüstenberga i Mundrego wad wzorcowych, wady płaskie o powierzchni kwadratowej są modelami wad małych. Otwory poziome miały długość większą od średnicy przekroju wiązki, a tylko ich średnice były mniejsze od rozmiaru odpowiedniego przekroju.

Wyniki cytowanej pracy potwierdzają liniowy wzrost wielkości przesuwu głowicy  $\Delta Z_{6dB}$  ze wzrostem odległości głowica-wada, początkowe malenie wartości przesuwu ze wzrostem rozmiaru wad małych oraz wykazują praktyczny brak zależności między średnicą poziomych otworów cylindrycznych i wartością przesuwu głowicy  $\Delta X_{6dB}$

Ilustrują to zaczerpnięte z omawianej pracy przykładowe wyniki pokazane na wykresach rys. 18 i 19.

#### 4.4. Unormowane wykresy zależności $\Delta Z/D - d/D$ .

Spodziewane zależności między wartościami przesuwu głowicy  $\Delta Z$  i rozmiarem wady płaskiej w kierunku przesuwu zarówno przy sześciodecybelowym spadku amplitudy echa jak też przy badaniu ze stałym progrem rejestrowalności przedstawiają wykresy pokazane na rys. 20, 21 i 22. Na osiach wykresu /20/ odłożono unormowany rozmiar wady  $d/D$  i unormowane przesunięcie  $\Delta Z/D$ . Poszczególne krzywe pokazują przebiegi tej zależności dla trzech różnych odległości głowica-wada wyrażonych w krotnościach długości pola bliskiego głowicy ultradźwiękowej. Pokazane przebiegi zależności  $\Delta Z/D - d/D$  nie uwzględniają początkowego spadku  $\Delta Z$  przy zwiększaniu średnicy małych wad kolistych. Krzywe na rys. 21 i 22 obrazują przebiegi zmian  $\Delta Z/D$  w zależności od  $d/D$  przy stałych progach rejestrowalności. Wykresy na rys. 21 dotyczą odległości głowica-wada równej jednej długości pola bliskiego, zaś wykresy na rys. 22 odległości równej dwóm długościom pola bliskiego. Poszczególne krzywe oznaczone - 10 dB, -20 dB, - 30 dB, -40 dB i - 50dB odpowiadają progom rejestrowalności przesuwu głowicy wyznaczonym przez amplitudy ech wad

równoważnych o poziomach odpowiednio 10 dB, 20 dB, 30 dB, 40 i 50 dB mniejszych od poziomu echa wady nieskończenie wielkiej znajdującej się w odległości  $y = 0$  od głowicy. Jeśli chcemy korzystać np. z krzywej oznaczonej -40 dB na wykresie dla odległości 2N należy ustawić wzmocnienie odbiornika o 40 dB większe od wzmocnienia odpowiadającego początkowi wykresu OWR. Łatwo sprawdzić, że tak wybraną granicę rejestrowalności przesunięcia stanowi amplituda echa wady równoważnej o rozmiarze unormowanym  $d/D = 0,085$ .

#### 4.5. Wartości poprawek $b_{\Delta W}$ .

W tabeli III zestawiono wyniki pomiaru poprawek przy  $\Delta W = 20$  dB dla kilku głowic normalnych przy jednej odległości  $y$  głowicy od dużej wady płaskiej zakończonej ostrą krawędzią w postaci linii prostej.

Ograniczono się do  $\Delta W = 20$  dB, to jest wartości spadku amplitudy odpowiadającego w praktyce granicy użytecznego pola akustycznego. Wartość  $\Delta W = 20$  dB znacznie przekracza lokalne zmiany amplitudy echa wady związane ze zmianą jakości sprzężenia.

Tabela III. Wartości poprawek  $b_{\Delta W}$  przy  $\Delta W = 20$  dB dla głowic fal podłużnych  $y = 120$  mm i 280 mm. Wada duża płaska zakończona prostą krawędzią.

Głowica	b teoret [mm]	y = 120 mm		y = 280 mm	
		b [mm]	b/b teor [%]	b [mm]	b/b teor [%]
1	2	3	4	5	6
0,8 LN25	20	40	200	96	480
1,5 LN25	25	30	120	76	304
2 LN7	6	30	500	65	1083
2 LN13	10	24	240	50	500
2 LN25	20	26	130	46	230
10 LN10	8	12	150	26	325

W symbolu głowicy /kolumna 1/ pierwsza cyfra oznacza częstotliwość rezonansową, litera L oznacza głowicę na fale podłużne, litera N - głowicę normalną tzn. wysyłającą fale ultradźwiękowe prostopadle do powierzchni kontaktowej, zaś ostatnia cyfra oznacza wymiar przetwornika /średnicę, albo bok/ w milimetrach.

W kolumnie 2 podano wartości poprawek teoretycznych wyliczonych według wzoru /2/. W kolumnach 3 i 5 umieszczono wartości poprawki wyznaczone doświadczalnie przy odległościach  $y = 120$  mm i  $y = 280$  mm. W kolumnach 4 i 6 podano wyrażone w procentach stosunki wartości poprawek teoretycznych do wyznaczonych doświadczalnie dla tych dwóch odległości.

Na rys. 23 zestawiono wyniki pomiarów zależności poprawki od odległości dla głowicy o częstotliwości 2 MHz i średnicy przetwornika 7 mm. Wybrano głowicę o dużej rozbieżności dla wyraźniejszego pokazania przebiegu zależności. Wartość poprawki teoretycznej jest stała. Niezależnie od odległości  $y$  i niezależnie od rodzaju wysyłanych fal wynosi 6 mm. Doświadczalnie wyznaczone wartości poprawek dla głowicy wysyłającej fale poprzeczne są mniejsze od poprawek dla tej samej głowicy wysyłającej fale podłużne. Jeśli wada duża jest zakończona małym cypłem, wartość poprawki jest większą niż w przypadku, gdy kończy się ostrą liniową krawędzią /przypadki pokazane na rys. 8 b/.

Wszystkie poprawki są mniejsze od szerokości wiązki  $b^*$  obliczonej dla  $\Delta W = 20$  dB przy założeniu odbicia od małego reflektora kulistego i oczywiście mniejsze od szerokości wiązki  $b_{\infty}$  obliczonej dla spadku ciśnienia do zera.

Wyniki pomiarów zestawione w tabeli III i przedstawione na wykresie rys. 23 potwierdzają zależność wartości poprawki od odległości /wzór 29/ oraz różnice zależności od odległości przewidziane wzorami 27 i 28. Różnice między wartościami szerokości wiązki wyznaczonej gdy stosujemy jako reflektor kulkę o małym promieniu  $b^*$ ,

dużą wadę płaską i wadę z "cyplem" są zrozumiałe. W przypadku kulki obwiednię wyznacza echo tego samego reflektora. Gdy fala odbija się od wady w położeniach I i II według rys. 8a czynne są różne reflektory. Stąd pojęcie skutecznej szerokości wiązki dla danej wady. Różnice między poprawką teoretyczną i doświadczalną są zależne od odległości i w warunkach opisanych pomiarów wartości doświadczalne w polu dalekim były większe od teoretycznych. W skrajnym przypadku głowicy 2LN7 wartość poprawki doświadczalnej dla odległości  $y = 280$  mm jest o 1080% większa od teoretycznej. Oznacza to różnicę ok. 6 cm w ocenie długości wady.

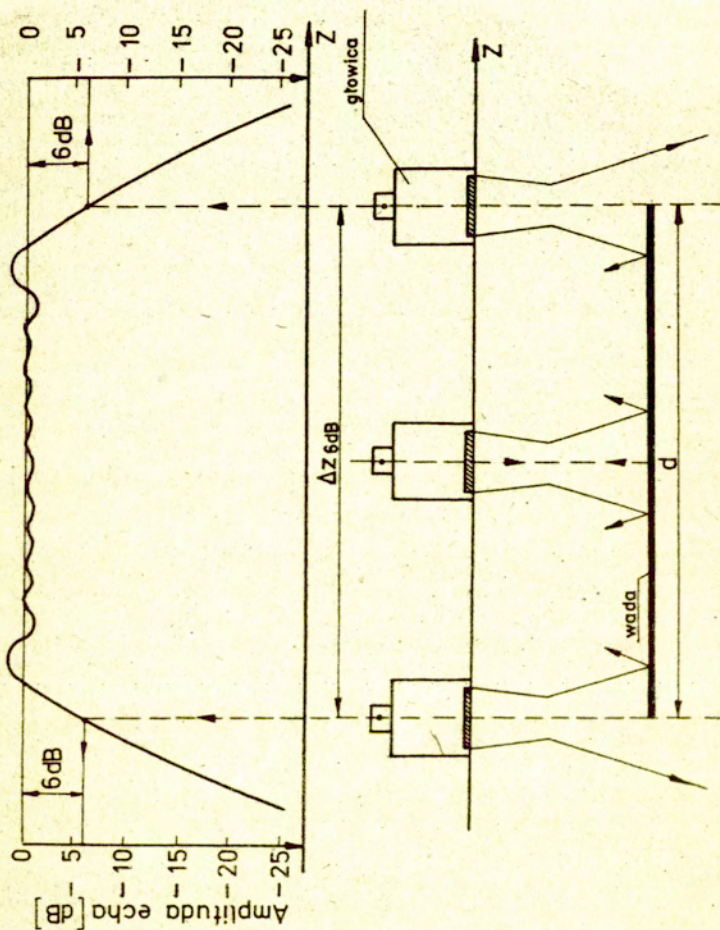
Z wykresu na rys. 23 widać, że gdy odległość zbliża się do długości pola bliskiego głowicy, wartości poprawek i oczywiście szerokości wiązki dążą do średnicy przetwornika. Pomiar prowadzone przy odległościach głowica-wada mniejszych od długości pola bliskiego przy użyciu głowic o większych rozmiarach przetworników wskazują na pewne prawidłowości i w tym zakresie odległości. Jeśli wada jest wadą dużą o liniowej krawędzi, to przy odległości mniejszej od połowy długości pola bliskiego dla spadku amplitudy echa wady  $\Delta W = 20$  dB uzyskuje się zgodność w granicach 25% ze wzorem /2/. Przy spadku  $\Delta W = 6$  dB środek głowicy wyznacza krawędź wady z dokładnością do 2 milimetrów. Przy odległościach większych od połowy długości pola bliskiego i przy większych wartościach  $\Delta W$ , zgodność z teorią [1,2,3] pogarsza się. Zaznacza się wpływ realnych parametrów wiązki. Jeśli wada ma kształt wąskiej wstęgi, rozbieżności między poprawkami teoretycznymi i doświadczalnymi nabastają. Uzyskuje się znaczny rozrzut danych. Wyniki te pozwalają dopuszczać stosowanie poprawek obliczanych wg wzoru /2/ przy ocenie rozmiarów wad dużych przy odległościach znacznie mniejszych od długości pola bliskiego.

## 5. Wnioski

- Dla płaskich wad kolistych o średnicach znacznie mniejszych od rozmiaru przetwornika  $/d \leq 0,6D/$  obserwuje się wzrost wartości  $\Delta Z_{6dB}$  wraz ze zmniejszaniem się średnicy wady. Ze wzrostem rozmiaru wady zależność  $\Delta Z_{6dB} = f(d)$  przechodzi przez łagodne minimum i następnie rośnie, dążąc dla  $d > D$  do postaci  $\Delta Z_{6dB} = d$ .
- Dla wad małych wartość  $\Delta Z_{\Delta W}$  jest proporcjonalna do odległości  $y$  od głowicy do wady. Kąt nachylenia prostej  $\Delta Z_{\Delta W} = f(d, y)_{d=const}$  jest zależny od kwadratu stosunku długości fali do średnicy przetwornika.
- Ze względu na niejednoznaczną zależność między  $\Delta Z_{6dB}$ , a rozmiarem wad  $d$  oraz ze względu na znaczny rozrzut wyników pomiarów przy ręcznym prowadzeniu głowicy praktycznie nie jest możliwy pomiar długości wad małych za pomocą metody przesuwu poprzecznego przy stałym  $\Delta W$ .
- Rozrzut wyników pomiarów silnie zależy od chropowatości powierzchni, a przy danym stanie powierzchni może być <sup>on</sup>poważnie zmniejszony przez przesuwanie głowicy wzdłuż prowadnicy.
- Do pomiarów oceniających rozmiary wad małych wydaje się bardziej predysponowany sposób oparty na pomiarze wartości przesuwu przy ustalonej czułości układu aparat-głowica. Przy takich pomiarach otrzymuje się ostrą i jednoznaczną zależność  $\Delta Z - d$ . Przy pomiarach należy uwzględnić odległościową zależność wartości  $\Delta Z$ .
- Dla każdej głowicy i dla wybranego rozmiaru wady progowej można znaleźć graniczną wartość odległości głowica-wada, poniżej której zmierzone przesunięcia  $\Delta Z$  dla wad małych będą mniejsze od pewnej przyjętej wartości. W szczególności można wyznaczyć graniczną wartość odległości, poniżej której wartości  $\Delta Z_{6dB}$  dla wad

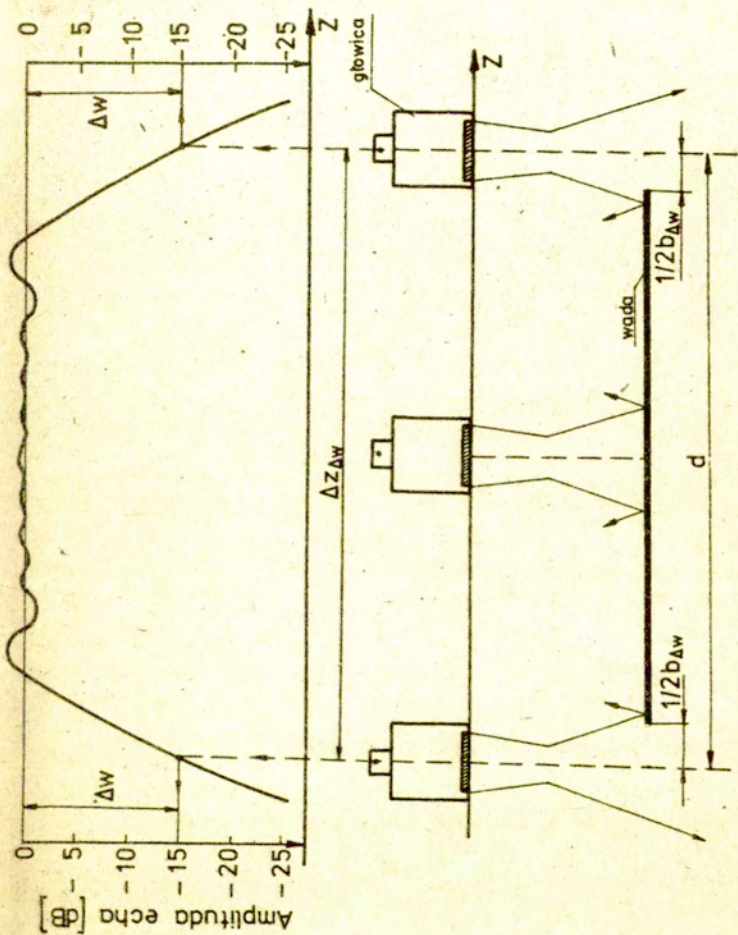
małych nie będą większe od średnicy przetwornika D, co pozwoli na uniknięcie błędnego kwalifikowania wad bardzo małych  $d \ll D$  do grupy wad ciągłych.

- Wyniki analizy i pomiarów potwierdzają zależność wartości poprawek  $b_{\Delta w}$  od odległości, rozmiarów wady i charakteru jej zakończenia.
- Wyniki badań wskazują na niebezpieczeństwo popełnienia dużych błędów przy ocenie rozmiarów wad przy stosowaniu "teoretycznego" sposobu obliczania poprawek.

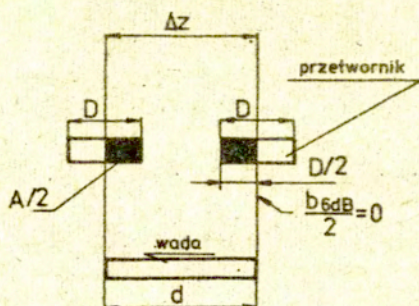


Rys. 1 Położenia głowicy nad dużą płaską wadą odpowiadające 6 decybelowej różnicy amplitudy echa wady.

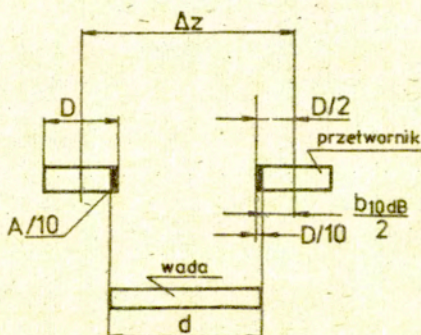




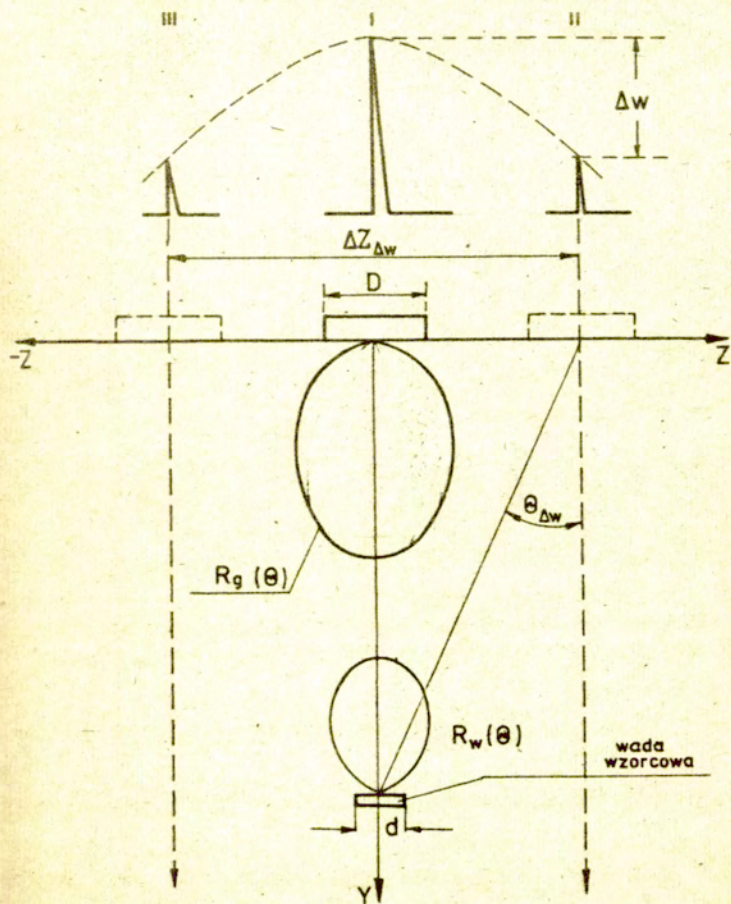
Rys. 2 Położenie głowicy nad dużą płaską wadą odpowiadającą spadkowi amplitudy echa wady o  $\Delta W > 6\text{dB}$ .



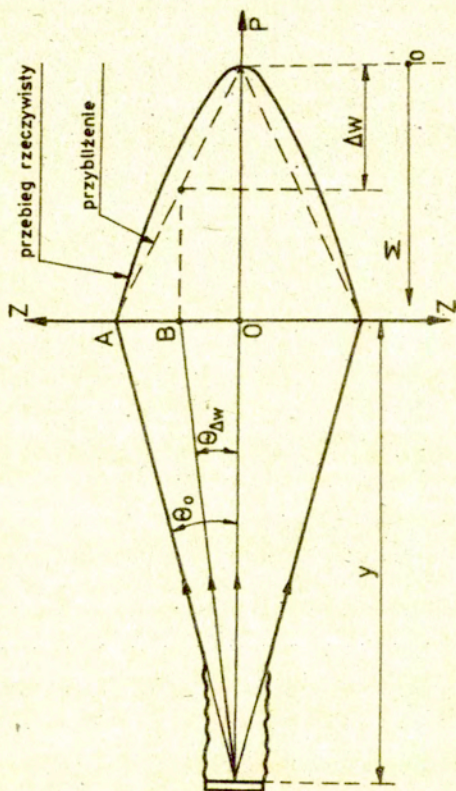
Rys. 3 Wzajemne położenia przetwornika i wady w skrajnych położeniach przy  $\Delta W = 6\text{dB}$ .



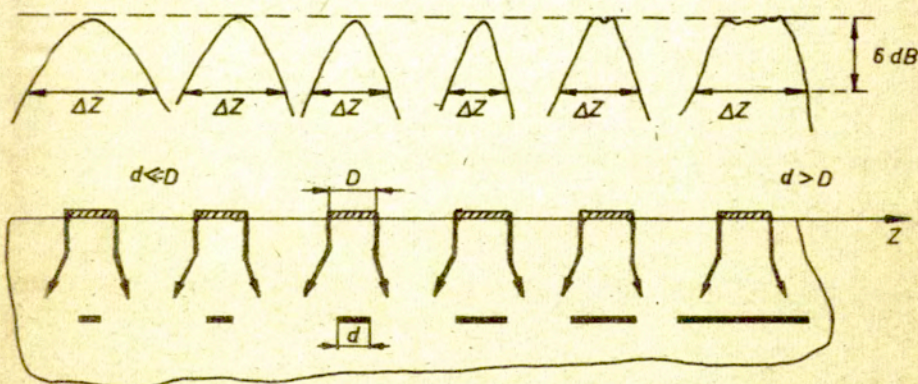
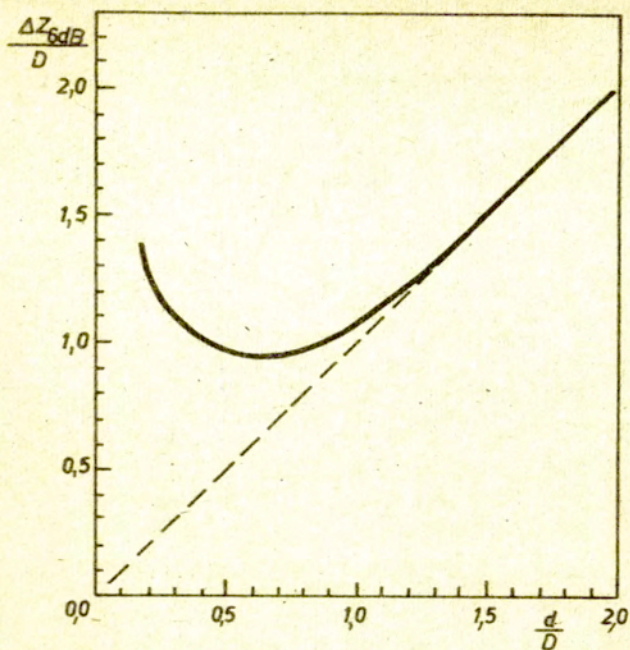
Rys. 4 Wzajemne położenia przetwornika i wady w skrajnych położeniach przy  $\Delta W = 20\text{ dB}$  [1] .



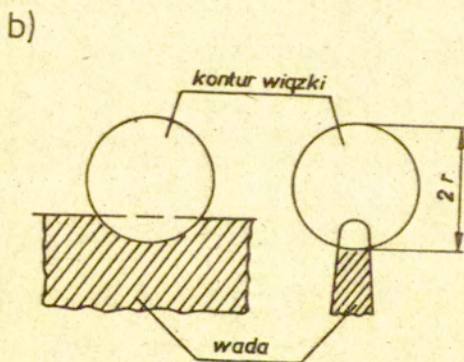
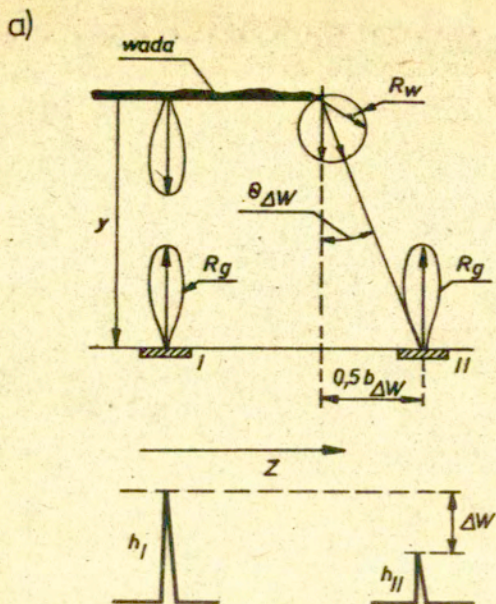
Rys. 5 Schemat badania zależności  $\Delta Z_{\Delta w} = f(d, y)$  dla wad małych.



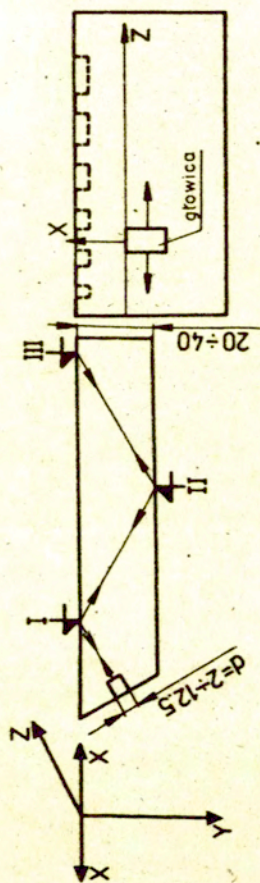
Rys. 6 Zasada konstrukcji przybliżonego wyrażenia opisu-  
jącego charakterystykę kierunkowości.



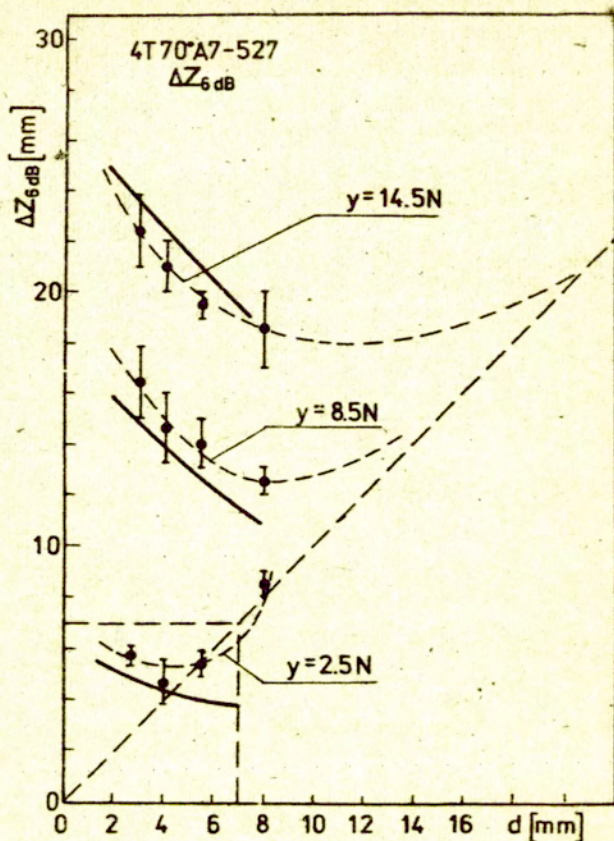
Rys. 7. Schematyczny przebieg zależności względnego przesuwu głowicy  $\Delta Z_{6dB}/D$  od względnego rozmiaru wady  $d/D$  przy stałej odległości głowica-wada.



Rys. 8 Schemat badania zależności  $\Delta Z_{\Delta W} = f/d, y/$  dla wad dużych  $b/$  krawędź wady dużej i wąskiej zakończenie wady w konturze wiązki.

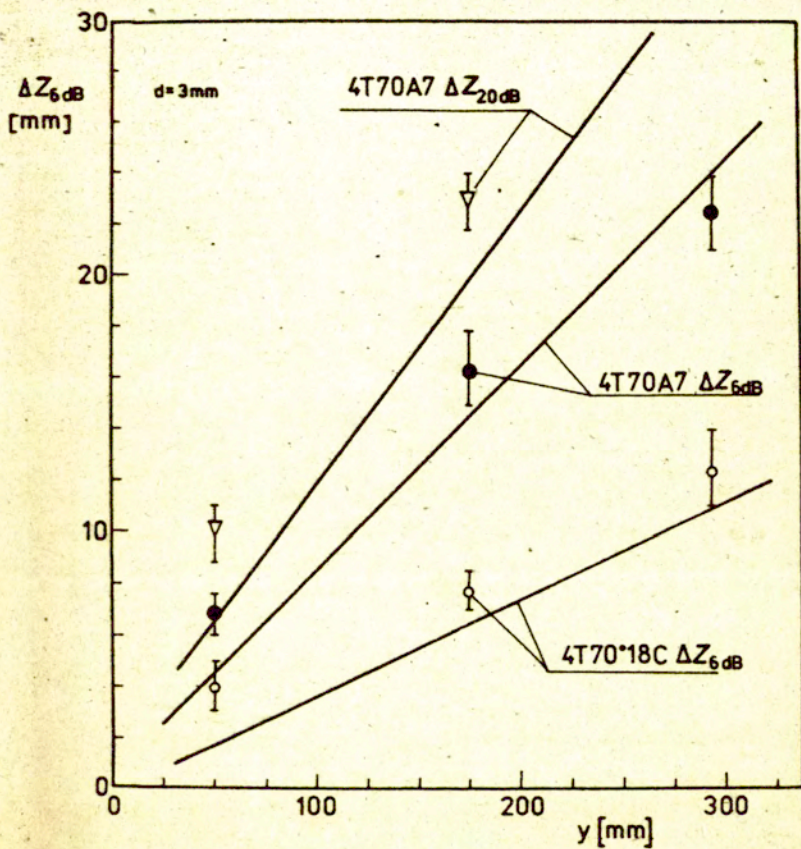


Rys. 9 Próbki zawierające wady wzorcowe w postaci otworów płaskodennych.

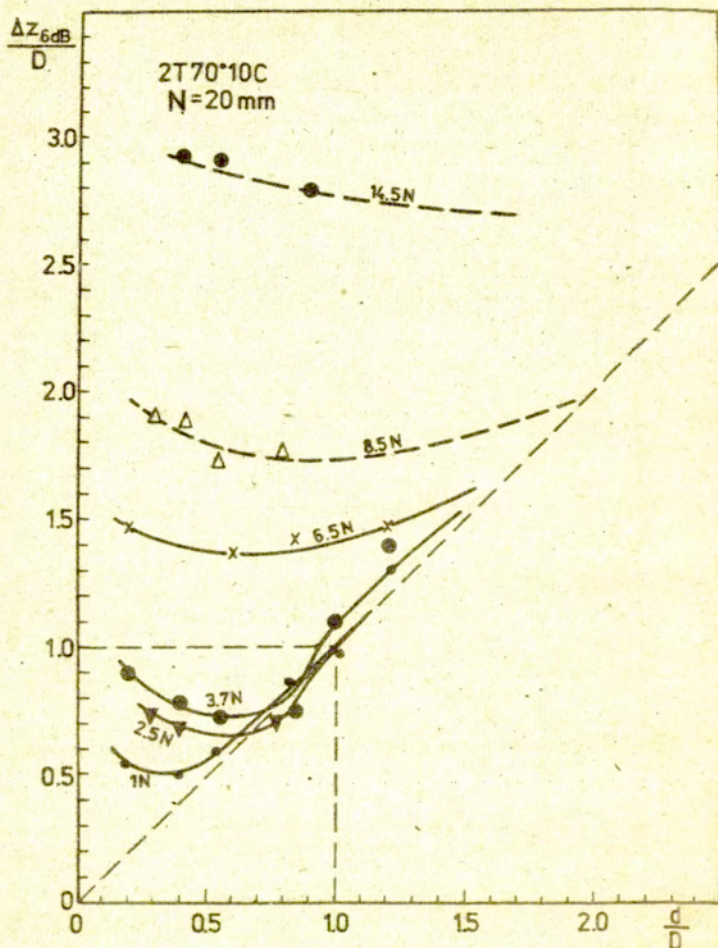


Rys. 10 Zależność  $\Delta Z_{6dB}$  od średnicy wady kołowej  $d$  dla trzech różnych odległości  $y$ . Głowica 4T70A7. Linia przerywaną zaznaczono przebiegi wyliczone dla tych odległości według wzoru (21).

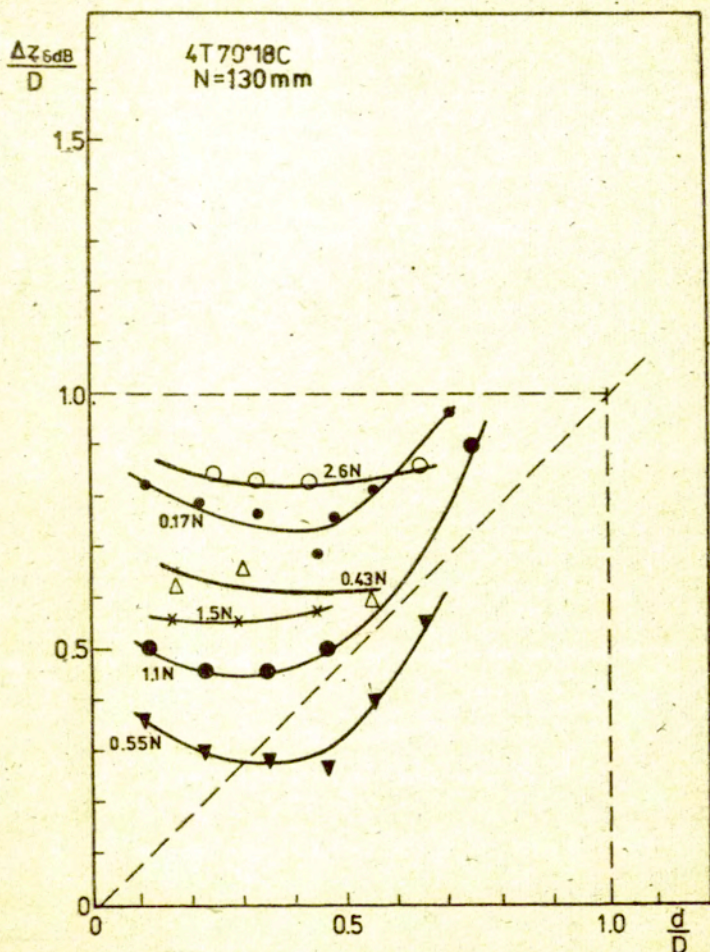




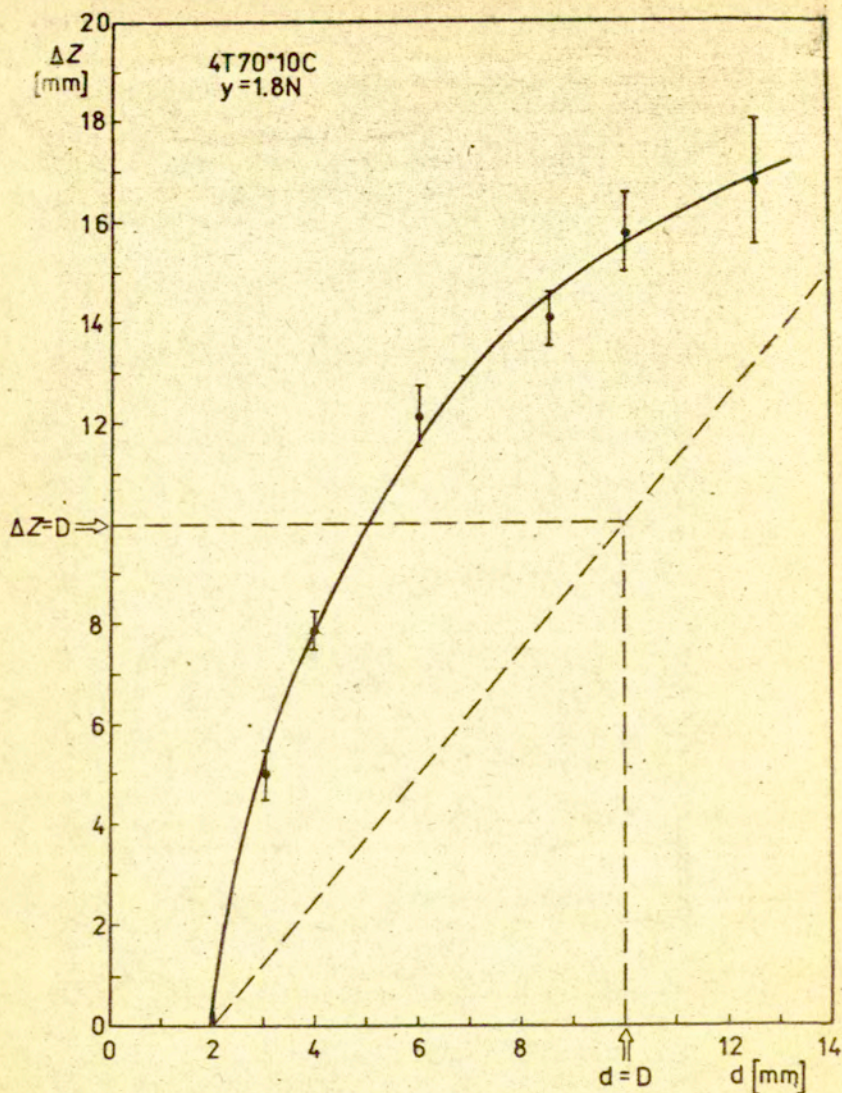
Rys. 11 Zależność  $\Delta Z_{6dB}$  od odległości  $y$  dla wady wzorcowej o średnicy  $d = 3\text{ mm}$ . Głowica 4T70A7 i 4T7018C.



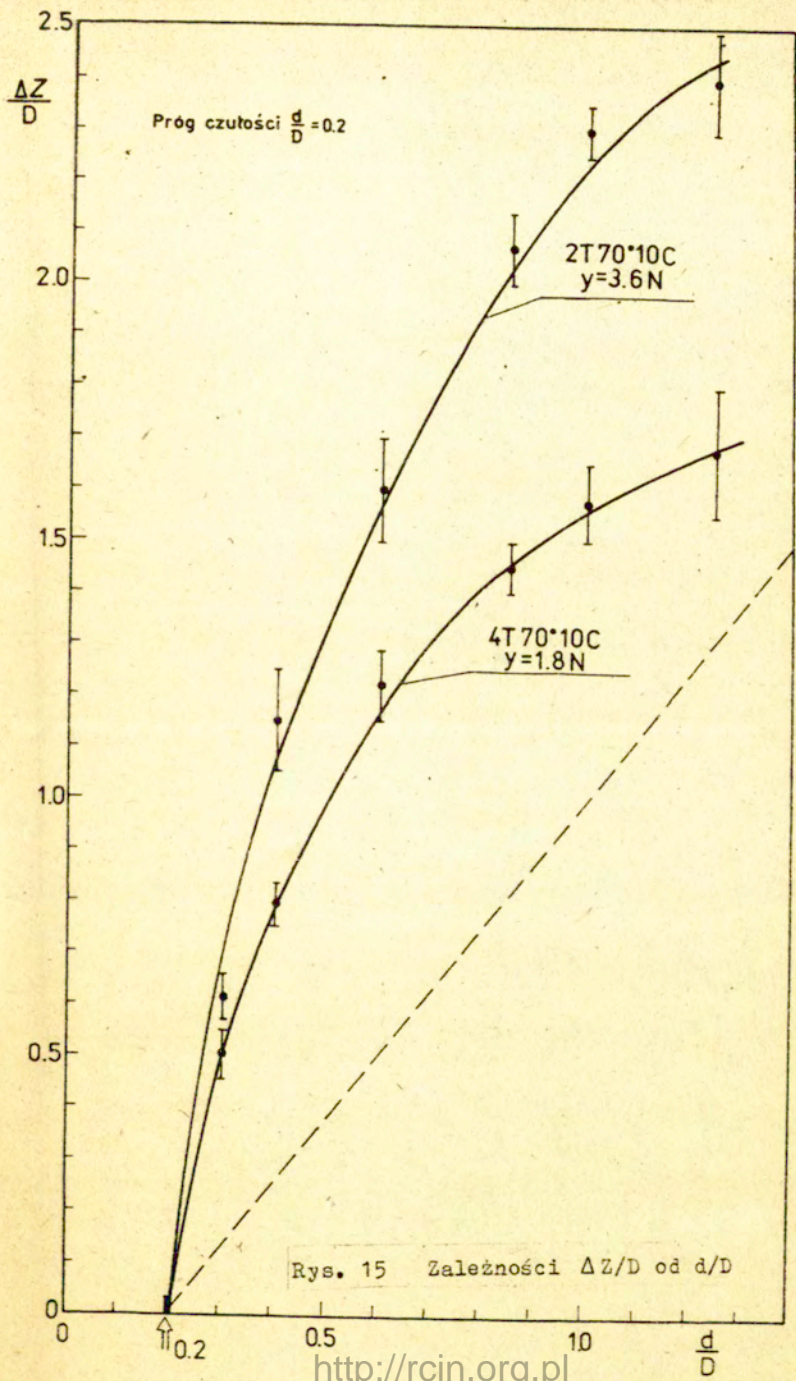
Rys. 12 Wyniki pomiarów  $\Delta Z_{6dB}/D$  dla wałków różnych rozmiarach unormowanych  $d/D$  uzyskane przy badaniu głowicą 2T70°10C.

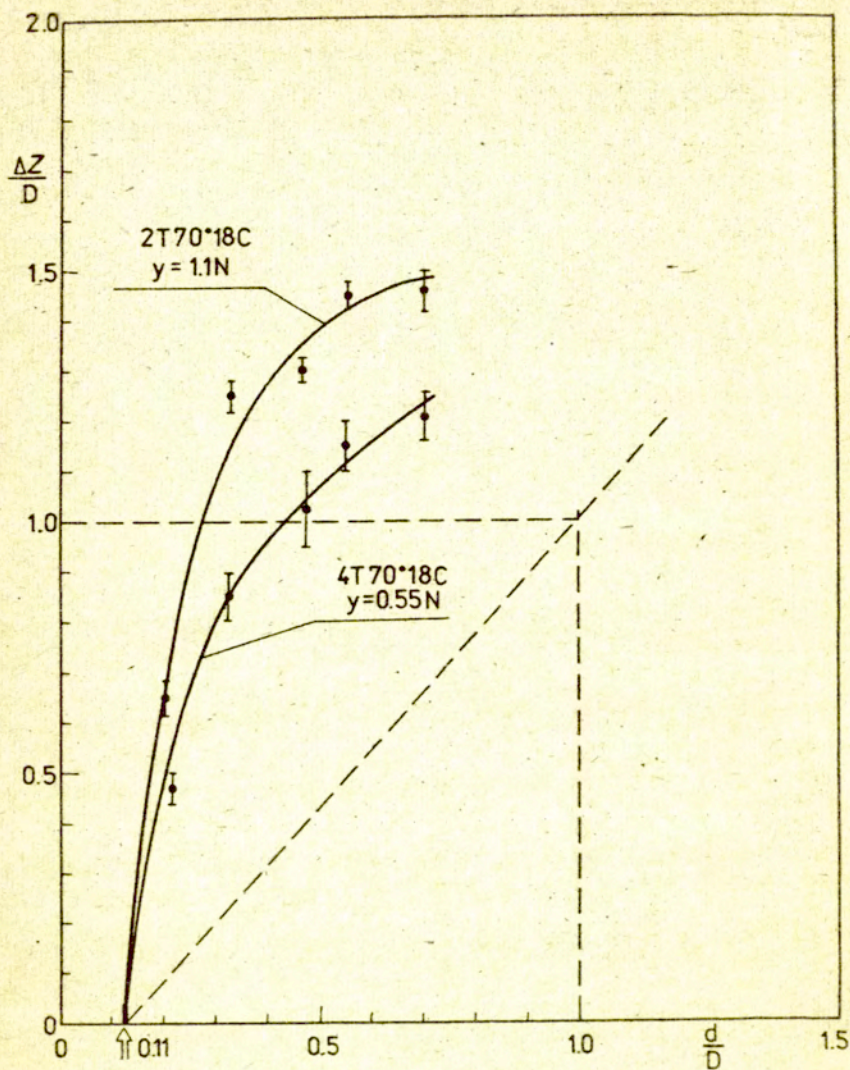


Rys. 13 Zależność unormowanego przesunięcia od unormowanego rozmiaru wady przy różnych odległościach do wady. Głowica 4T 70°18C.

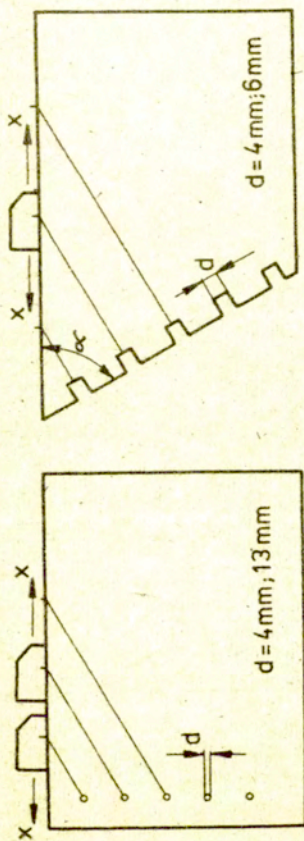


Rys. 14 Zależność  $\Delta Z$  przy stałym progu czułości od średnicy wady wzorcowej  $d$ . Głowica 4T7010C. Odległość głowica-wada  $\gamma = 1.8N$ . Próg czułości odpowiada amplitudzie echa wady  $d = 2$  mm z odległości  $1,6N$ .

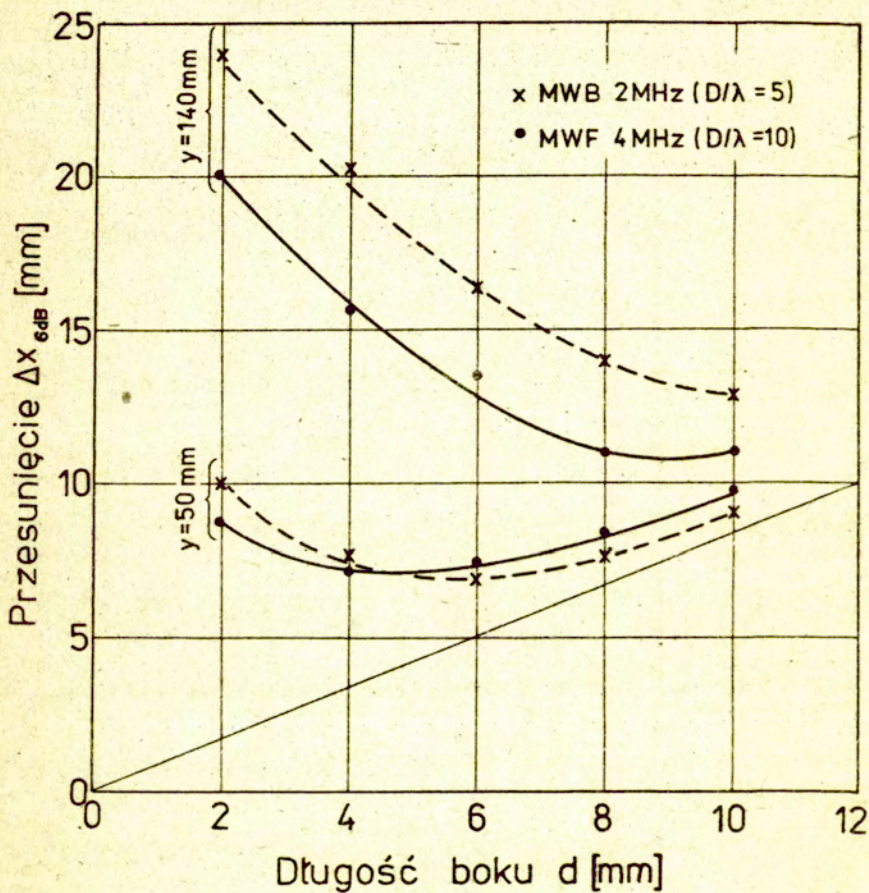




Rys. 16 Zależności  $\Delta Z/D$  od  $d/D$  przy progu czułości odpowiadającym amplitudzie echa wady  $d/D = 0,11$  z odległości  $y = 75$  mm dla głowic 4T70<sup>0</sup>18C i 2T70<sup>0</sup>18C.

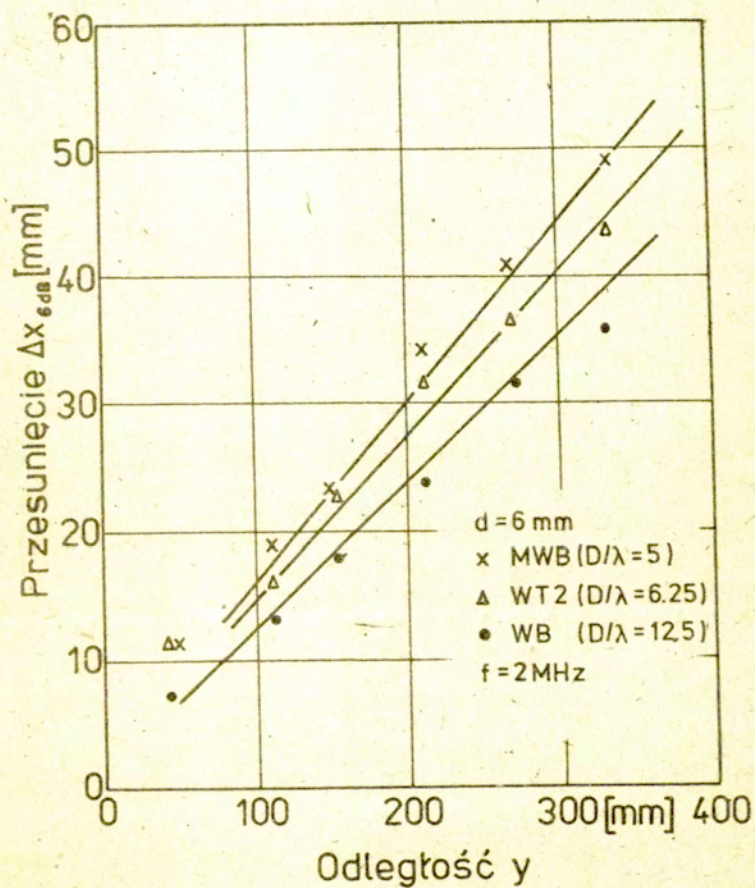


Rys. 17 Próbki zawierające wady wzorcowe wykorzystywane w pracy Wüstenberga i Mundrego [5].

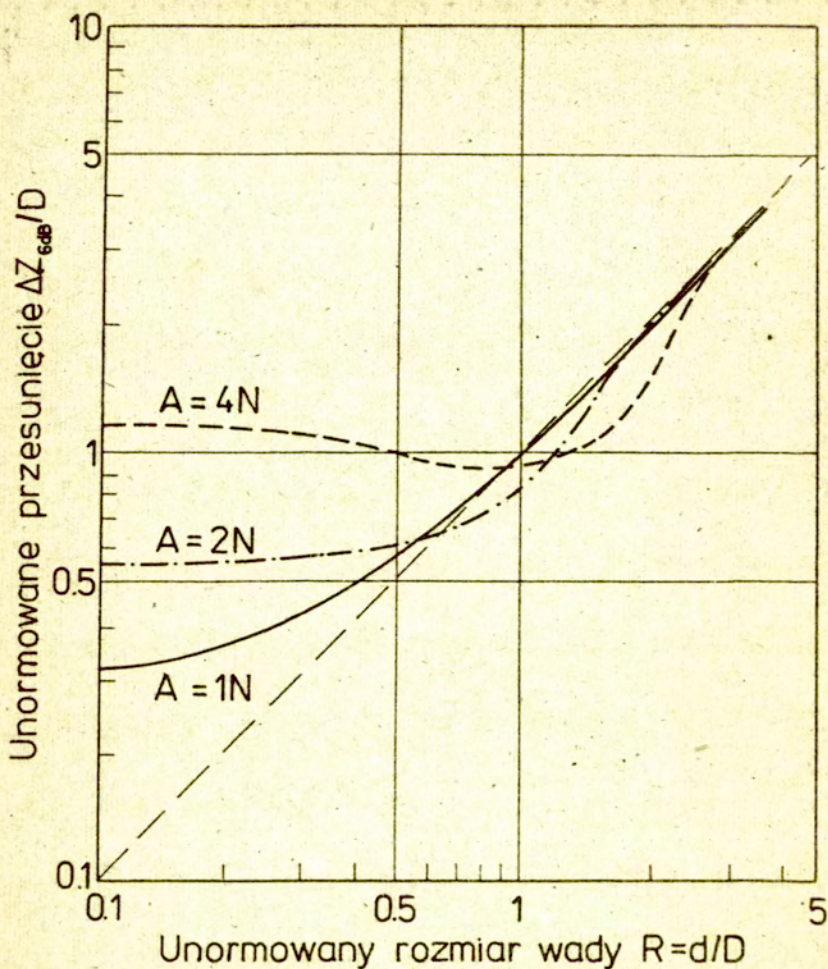


Rys. 18 · Wartość  $\Delta X_{6dB}$  dla płaskodennych otworów kwadratowych o różnej szerokości.

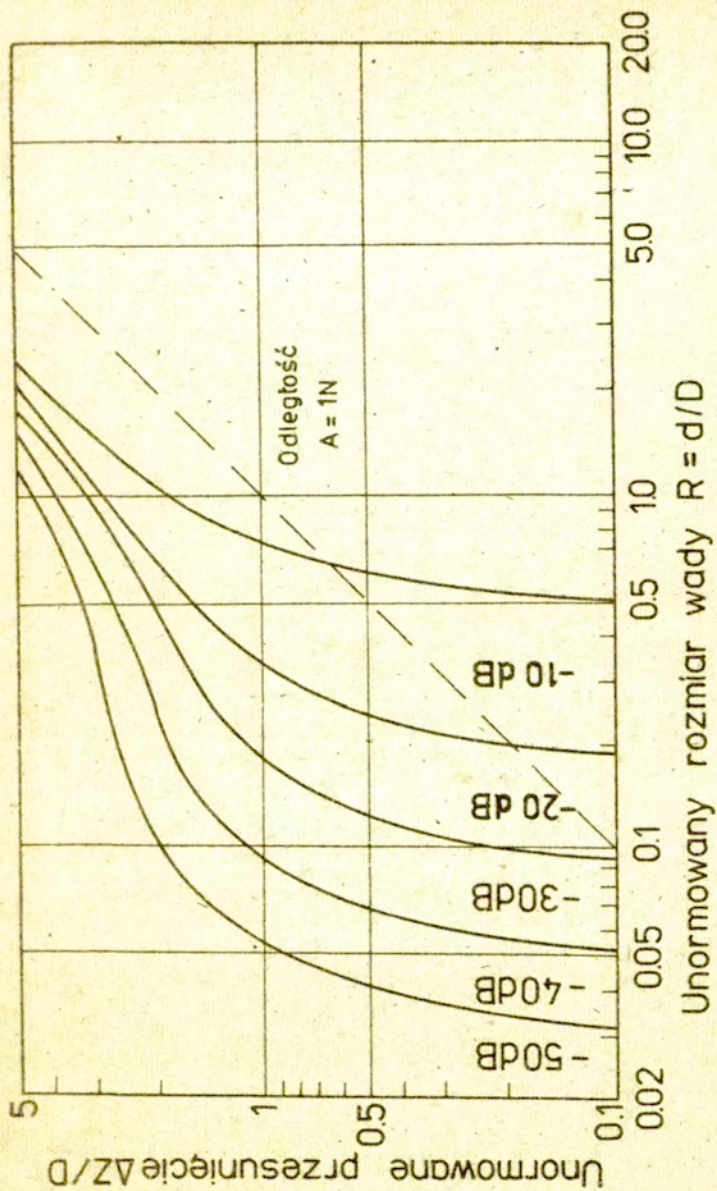




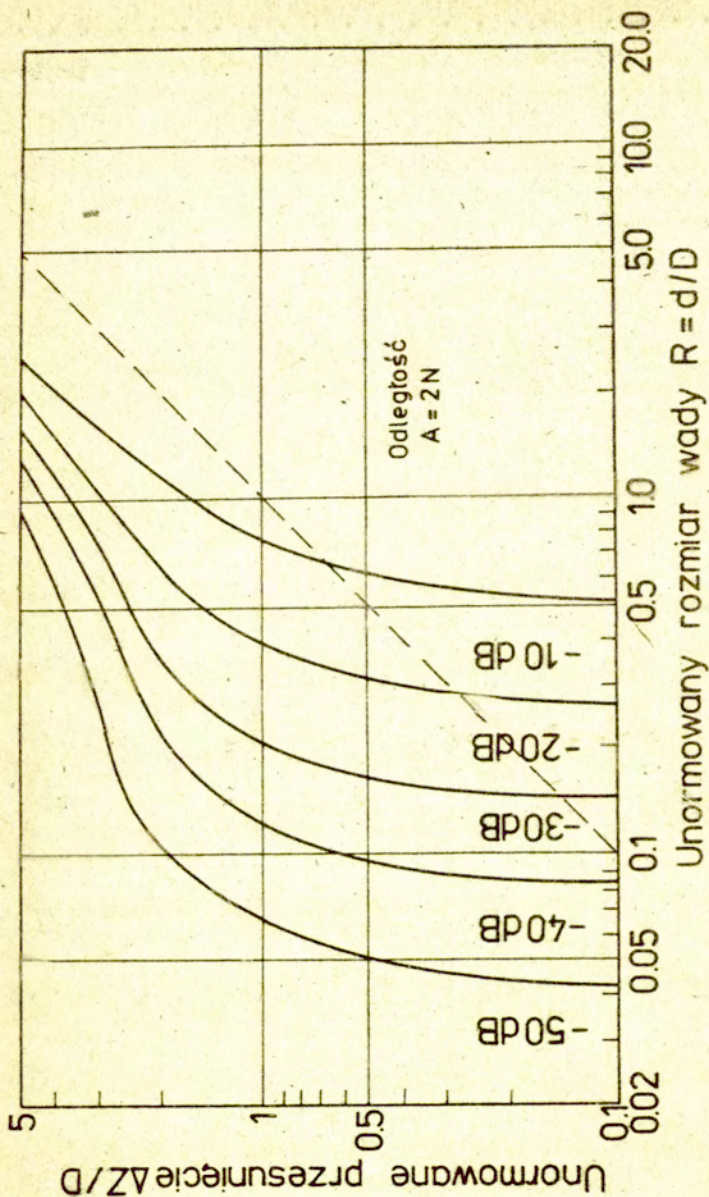
Rys. 19 Zależność wartości  $\Delta X$  6dB od odległości głowica-wada



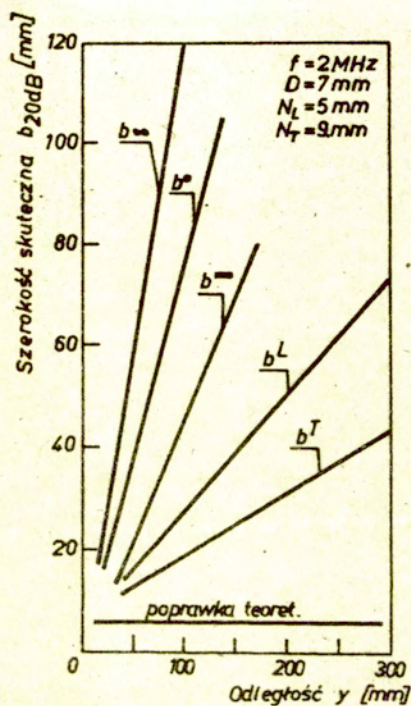
Rys. 20 - Wartości unormowanego przesuwu głowicy  $\Delta Z_{6dB}/D$  dla płaskich wad kołowych o średnicach unormowanych  $d/D$ . Poszczególne krzywe dotyczą wad znajdujących się w odległościach 1N, 2N, 4N 8 .



Rys. 21 Zależność unormowanego przesuwu głowicy  $\Delta Z/D$  od unormowanego rozmiaru wady  $d/D$  przy różnych wartościach poziomu amplitudy progowej. Odległość głowica-wada wynosi  $1N$  [8].



Rys. 22 Zależność  $\Delta Z/D$  od  $d/D$  przy różnych progach czułości. Odległość głowica-wada wynosi 2N [8].



Rys. 23 Zależność poprawki  $b_{20}$  od odległości  $y$  dla głośnicy o częstotliwości 2MHz i średnicy przetwornika  $D = 7\text{mm}$ .

## LITERATURA.

1. PAWŁOWSKI Z., Ultradźwiękowe badania materiałów. Program i opisy ćwiczeń. Kurs specjalistyczny. Załącznik H-1. Repetytorium R-10. Pomiar wielkości wady metodą przesuwu poprzecznego. ODK-SIMP - ZBN IPPT PAN. Warszawa 1977.
2. PAWŁOWSKI Z., Ultradźwiękowe badania materiałów. Program i opisy ćwiczeń. Kurs specjalistyczny. Warszawa 1978. ODK SIMP Warszawa. Str. 41.-43.
3. PAWŁOWSKI Z., SZELAŻEK J., GORZNY J., Dimensioning, Identification and Evaluation of Weld Defects with Ultrasonics. Proc. 9 World Conference on Non - Destructive Testing. November 18-23, 1979. Melbourne. Referat 3B-1.
4. SCHLENGERMANN U., Problems regarding sound field structure when testing materials with ultrasound. Proc. 7 ICNDT Warszawa, 4-8 June 1973. Referat H-02.
5. WÜSTENBERG H., MUNDRY E., Beitrag zur Halbwertstiefenausdehnung von Reflexionsstellen in der Materialprüfung mit Ultraschall. Materialprüfung. 13/1971/, str. 329-335.
6. JOCEV B., Ultradźwiękowa metoda oceny rozmiarów wad makrostruktury ośrodków izotropowych i anizotropowych. Praca doktorska. IPPT-PAN, 1974.
7. KRAUTKRÄMER J. und H., Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Springer-Verlag. Berlin, 1975. Str. 61.
8. SCHLENGERMANN U., Das Krautkrämer Taschenbuch. Krautkrämer GmbH, Köln, 1976. Str. 57 i 60.