

Praca doktorska

Jacek Szelażek

METODA PRZEMIESZCZENIA
GŁOWICY ULTRADŹWIEKOWEJ
W ZASTOSOWANIU DO POMIARÓW
NIECIĄGŁOŚCI MATERIAŁÓW

23/1987

23/1987

P.269



WARSZAWA 1987

ISSN 0208-5658

Praca doktorska

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 26 czerwca 1987 r.



56833



Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 170 egz. Ark.wyd.5,85 Ark.druk.8,25
Oddano do drukarni w lipcu 1987 r.
Nr zamówienia 418/87

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

Jacek Szelażek

Zakład Teorii Ośrodków Ciągłych IPPT PAN

METODA PRZEMIESZCZENIA GŁOWICY ULTRADŹWIĘKOWEJ W ZASTOSOWANIU DO POMIARÓW NIECIAĞŁOŚCI MATERIAŁÓW

STRESZCZENIE

Tematem pracy jest analiza możliwości wykorzystania jednej z najczęściej stosowanych i zarazem najstarszej metody oceny wielkości wad w nieniszczących, ultradźwiękowych badaniach materiałów. Jest to metoda Przesuwu Poprzecznego /dalej nazywana krótko metodą PP/, która wiąże zmiany amplitudy impulsu odbitego od wady, obserwowane podczas przesuwu głowicy, z wymiarem wady.

W praktyce defektoskopii ultradźwiękowej utarło się, że metoda ta stosowana może być do oceny rozmiarów rozległych wad płaskich oraz długości wad liniowych. Z obecnego stanu wiedzy /rozdz. 2 i 3/ nie wynika jednak jak stwierdzić czy wykryta wada jest dostatecznie „duża” lub „długa” aby ocenić jej wielkość metodą PP. Proponowane przez niektórych autorów ograniczenia metody opierają się nie na obserwowanych podczas badania zmianach amplitudy echa a na wielkości wady, czyli wielkości nieznanej w czasie pomiaru.

Brak jest również wiadomości jak na podstawie uzyskanych podczas pomiaru danych stwierdzić czy wykryta wada jest wadą płaską. Nieznana jest też ogólna zależność możliwości metody PP od wzajemnych korelacji pomiędzy długością przesuwu głowicy, wielkością wady a odległością głowica-wada. Jednocześnie stosowanie metody PP zalecane jest przez szereg norm i dokumentów technicznych opisujących sposoby badań ultradźwiękowych.

W pracy podjęto eksperymentalną i numeryczną analizę powyższych zagadnień. Celem tej analizy jest znalezienie sposobów bardziej dokładnego pomiaru wielkości wad materiałów na podstawie zmian amplitudy echa zachodzących podczas przesuwu głowicy /rozd.3/

Do analizy możliwości i ograniczeń metody PP wykorzystano wyniki numerycznego modelowania amplitudy impulsu odbitego od wady w funkcji położenia głowicy. Wyniki obliczeń potwierdzone są rezultatami badań doświadczalnych przeprowadzonych na próbkach metalowych /rozd.4 i 5/.

Badania obejmują dwa najważniejsze z praktycznego punktu widzenia obszary zastosowania metody PP. Są to pomiary wielkości wad głowicami normalnymi generującymi wiązki fal podłużnych oraz głowicami skośnymi, które wytwarzają w badanym materiale wiązki fal poprzecznych.

Dla głowic normalnych przedstawiono dwa przypadki usytuowania wad: w ośrodku nieograniczonym oraz wad rozpoczynających się od bocznej ściany materiału i tworzących z nią naroże.

Wynikiem przeprowadzonych pomiarów i obliczeń są zależności wiążące długość przesuwu głowicy o danej wielkości i częstotliwości drgań przetwornika z własnościami akustycznymi materiału, wielkością i odległością wady od głowicy. Dla głowic skośnych dodatkowym parametrem zależności jest kąt załamania wiązki fal.

Podsumowanie /rozd.6/ zawiera wnioski wypływające z uzyskanych w pracy wyników. Wskazują one, że w ogólnej zależności mierzonej podczas pomiaru długości przesuwu głowicy od wielkości wady wyróżnić można pewne charakterystyczne

obszary. W obszarach tych stosowanie metody PP napotyka na różne ograniczenia lub też nie jest możliwe. Granice obszarów są funkcjami długości przesuwu głowicy i odległości pomiędzy głowicą a wadą. Przebiegają one też różnie w zależności od spadku amplitudy echa przyjmowanego przy pomiarze przesuwu głowicy.

W pierwszym z obszarów długości przesuwu głowicy są proporcjonalne do wymiarów wad. W drugim — temu samemu przesuwowi głowicy odpowiadają wady o dwóch różnych wielkościach. W trzecim obszarze wskazania nie pochodzą od wad płaskich, stosowanie metody PP w tym obszarze prowadzi do niebezpiecznego zaniżania wielkości wady.

Z przedstawionych w pracy zależności wynika, że istnieją odległości pomiędzy głowicą a wadą, dla których wadom o różnych wielkościach odpowiadają podobne długości przesuwu głowicy. Są to odległości niekorzystne z punktu widzenia możliwości stosowania metody PP.

Zaproponowano praktyczne wykorzystanie graficznie przedstawionych zależności nazwanych Wykresami PP /zał.2/. Znajomość zmierzonej długości przesuwu głowicy i odległości głowica-wada pozwala na umiejscowienie na wykresie punktu. Położenie punktu w jednym z obszarów wykresu wskazuje bądź wielkość badanej wady, bądź informuje o niemożności pomiaru wielkości danej wady metodą PP bądź też wskazuje na konieczność rozróżnienia czy wykryta wada jest „mała” czy „duża”. Wykorzystanie Wykreśłów PP przy pomiarach prowadzonych dwiema różnymi głowicami pozwala na wnioskowanie o formie wady i rozróżnianie wad płaskich, wklęsłych i wypukłych.

1. WPROWADZENIE

Piętnaście lat po przedstawieniu koncepcji wykrywania wewnętrznych wad materiałów przy pomocy fal ultradźwiękowych /S.J. Sokolov 1929/ metoda ta znalazła praktyczne zastosowania /F.A. Firestone i D.O. Spourle 1945/.

Początkowo celem badań było tylko wykrycie niewidocznych wad makrostruktury materiału. Mechanika pękania i jej praktyczne zastosowania postawiły przed defektoskopią ultradźwiękową nowe zadanie - ocenę rozmiarów wykrytych wad. Jego realizacja stała się możliwa dzięki rozwojowi aparatury, pracom nad materiałami piezoelektrycznymi i poznaniu mechanizmów zjawisk akustycznych.

Najstarszym sposobem oceny wielkości dużej wady było wyznaczenie konturu wady na powierzchni materiału, z której wprowadzano fale ultradźwiękowe. Kontur ten odpowiadał obszarowi, w którym odbierano impulsy fal ultradźwiękowych odbitych od wady /tak zwane „echo wady"/ i w przybliżeniu obrazował jej wielkość. Z tego intuicyjnie wyczuwanego związku powstała metoda wiążąca wymiar wady /na przykład jej długość lub szerokość/ z długością odcinka, na którym podczas prostoliniowego przesuwu głowicy obserwowany jest impuls fal odbitych od wady. Jest to metoda PP nazwana tak od słów Przesuwu Poprzeczny lub Przemieszczenie Przetwornika lub też Pomiar Przemieszczenia głowicy.

W roku 1959 J. Krautkrämer przedstawił koncepcję wykorzystania do wyznaczania rozmiarów wad zależności wiążącej ciśnienie akustyczne impulsu odbitego od wady z jej wielkością i wprowadził pojęcie wady równoważnej /wady o znanej geometrii i takiej wielkości, że ciśnienie akustyczne fal odbitych od niej jest równe ciśnieniu fal odbitych od rzeczywistej wady/. Zależność ta stanowi podstawę metody OWR /od słów Odległość, Wzmocnienie i Rozmiar/. Metoda ta pozwala na wyznaczenie rozmiaru reflektora równoważnego wykrytej wadzie, przy znajomości odległości pomiędzy głowicą a wadą i ciśnienia akustycznego echa wady. Stosowana może ona być jedynie do oceny nieciągłości mieszczących się w przekroju wiązki fal generowanych w materiale przez głowicę.

Historycznie przyjęto się, że metoda PP wykorzystywana była do oceny rozmiarów wad „dużych” a metoda OWR do wyznaczania wielkości wad „małych”, choć same wady, z natury ich powstawania, niechętnie poddają się takiemu prostemu podziałowi.

Metody PP i OWR stosowane są powszechnie podczas badań prowadzonych standardową aparaturą i głowicami generującymi w badanym materiale wiązki fal podłużnych, poprzecznych, powierzchniowych czy fal Lamba. Najczęściej są to wiązki niekształtowane – to znaczy wytwarzane przez płaskie, kołowe lub prostokątne przetworniki piezoelektryczne przyłożone bezpośrednio lub poprzez klin załamujący do powierzchni materiału. Głowice takie, w odróżnieniu od głowic ogniskujących, posiadają szerokie strefy czułości /strefy skuteczne/, co w nieniszczących badaniach ultradźwiękowych ułatwia wykrycie wad.

Rozwój elektroniki, szybkie analogowo cyfrowe przetwarzanie sygnałów umożliwiły wykorzystanie do oceny wad analizy impulsu lub grup impulsów odbitych od wady. Badane są możliwości wykorzystania do oceny rozmiarów nieciągłości analizy widmowej, stosowanej w technice radarowej metody SAFT /synthetic aperture focusing technique/, holografii ultradźwiękowej czy też sposobów rekonstrukcji geometrii wad opartych na pomiarach czasu przejścia i amplitudy /metoda ALOK/. Jednocześnie do wyznaczania głębokości pęknięć wykorzystuje się fale dyfrakcyjne powstające na ich krawędziach. Zjawisko dyfrakcji fal na wadach objętościowych /jak pęcherze/, propagacja fal obiegowych /creeping waves/ i możliwości pomiaru czasu pomiędzy impulsem odbitym od powierzchni wady a impulsem pochodzącym od fali obiegowej znalazły zastosowanie przy ocenie wielkości wad objętościowych. Metody te wymagają jednak stosowania skomplikowanej i kosztownej aparatury lub też wykorzystane mogą być prawie wyłącznie w warunkach laboratoryjnych.

W większości wykonywanych defektoskopowych badań ultradźwiękowych stosowane są dwie najstarsze i zarazem najprostsze metody oceny wielkości wad – PP i OWR. Są one rozwijane i doskonalone, wykorzystuje się je oddzielnie lub

w połączeniu i pomimo ich niedoskonałości i ograniczeń stanowią do dzisiaj podstawę oceny rozmiarów wykrytych wad.

2. STAN ZAGADNIENIA

2.1. Rozwój metody PP

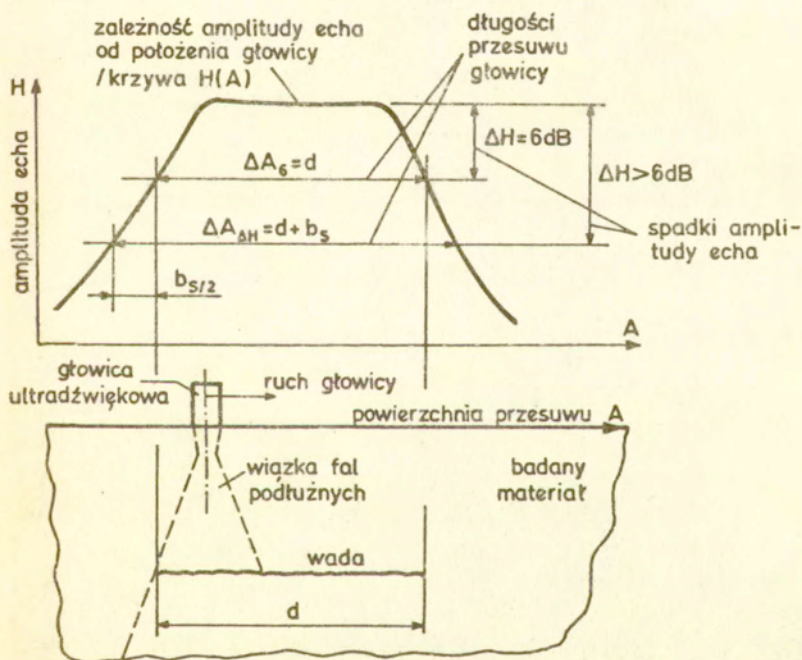
Metoda PP wiąże długość odcinka, na którym podczas przesuwu głowicy po powierzchni materiału obserwowany jest impuls fal odbitych od wady /echo wady/ z jej wymiarem w kierunku przesuwu głowicy. Przemieszczając głowicę w różnych kierunkach i stosując tę metodę, wyznaczyć można kontur wady, jej długość i szerokość oraz obliczyć powierzchnię wady. W odróżnieniu od metody OWR nie wykorzystuje one bezwzględnej wartości amplitudy echa, proporcjonalnej do ciśnienia akustycznego wiązki fal odbitych od wady i padających na przetwornik, a jedynie zmiany amplitudy odpowiadające różnym położeniom głowicy względem wady.

Metoda PP stosowana jest przy badaniu głowicami normalnymi, kiedy oś wiązki fal generowanych w materiale przez przetwornik głowicy jest prostopadła do kierunku przesuwu głowicy oraz przy badaniu głowicami skośnymi, gdzie oś wiązki jest nachylona do powierzchni materiału.

Sposób wyznaczania konturu dużej, płaskiej wady głowicą normalną polega na wykorzystaniu faktu, że amplituda impulsu odbitego od wady spada do połowy wartości maksymalnej w momencie, gdy oś symetrycznej wiązki fal trafia na krawędź wady. Długość przesuwu głowicy pomiędzy takimi położeniami, to znaczy długość przesuwu przy spadku amplitudy echa o 6dB /czyli o 50%/ jest równa wymiarowi wady. Dla spadków amplitudy echa o wartości większe niż 6dB, długość przesuwu jest większa niż wymiar wady o pewną wartość b_s , zwaną poprawką. Sposób wyznaczania wymiaru wady metodą PP przy wykorzystaniu głowicy normalnej pokazano na rys.1. w dolnej części widoczna jest głowicy ultradźwiękowa, kontury rozbieżnej wiązki fal i wada. W górnej części pokazano zależność amplitudy echa H

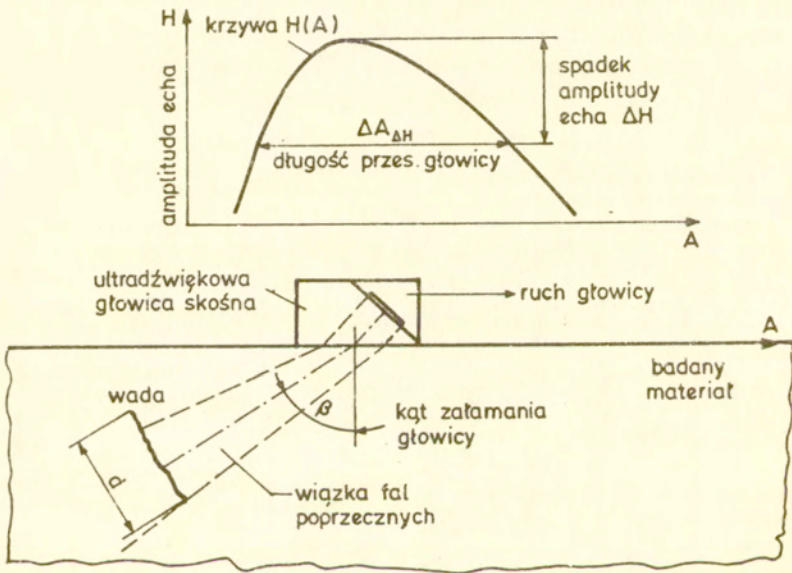
od położenia głowicy A . W środowisku badań nieniszczących zależność ta często nazywana jest „obwiednią echa wady”. W dalszej części pracy, dla skrócenia, zależność ta będzie nazywana krzywą $H(A)$.

Podczas przesuwu głowicy amplituda echa osiąga maksymalną wartość gdy reflektor jakim jest wada wypełnia całą szerokość wiązki fal. W miarę gdy coraz mniejsza część wiązki ulega odbiciu na wadzie, amplituda echa spada i osiąga wartość zerową gdy reflektor znajdzie się poza wiązką. Każdemu spadkowi amplitudy ΔH odpowiada określona długość przesuwu głowicy ΔA , tym większa im większy jest spadek amplitudy.



Rys.1. Schemat pomiaru wielkości wad metodą PP, głowicą normalną.

Pierwsze prace zajmujące się metodą PP opisują badania wielkości wad wykrywanych głowicami skośnymi generującymi wiązki fal poprzecznych. Celem tych prac było zbadanie możliwości oceny rozmiarów wad wykrywanych podczas ultradźwiękowej kontroli jakości spoin. Schemat pomiarów wielkości takich wad metodą PP przy wykorzystaniu głowicy skośnej pokazano na rys.2.



Rys.2. Schemat pomiaru wielkości wady metodą PP, głowicą skośną.

Na trak korelacji między wymiarem wady a długością przesuwu głowicy zwrócili uwagę w 1970r Deputat, Mazurek i Pawłowski [1] badając krzywe $H(A)$ uzyskane głowicami skośnymi. Pomiary przeprowadzone były na naturalnych wadach spoin o dużych grubościach a ich celem było wyznaczenie metodą PP wysokości wad.

Wustenberg i Mundry [2] prowadząc pomiary krzywych $H(A)$ sztucznych wad spoin głowicami skośnymi stwierdzili, że w zależności

od stosunku rozmiaru wady płaskiej do rozmiaru przetwornika piezoelektrycznego głowicy, wyróżnić można trzy grupy wad:

- 1 — wady „małe” względem przetwornika — długość przesuwu głowicy zależy praktycznie tylko od charakterystyki kierunkowości głowicy,
- 2 — wady „średnie” — długość przesuwu głowicy jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości wady,
- 3 — wady „duże” — długość przesuwu głowicy jest proporcjonalna do wielkości wady.

Autorzy zwrócili też uwagę, że dla wad cylindrycznych długość przesuwu głowicy praktycznie nie zależy od średnicy wady a tylko od charakterystyki kierunkowej wiązki fal generowanych przez głowicę.

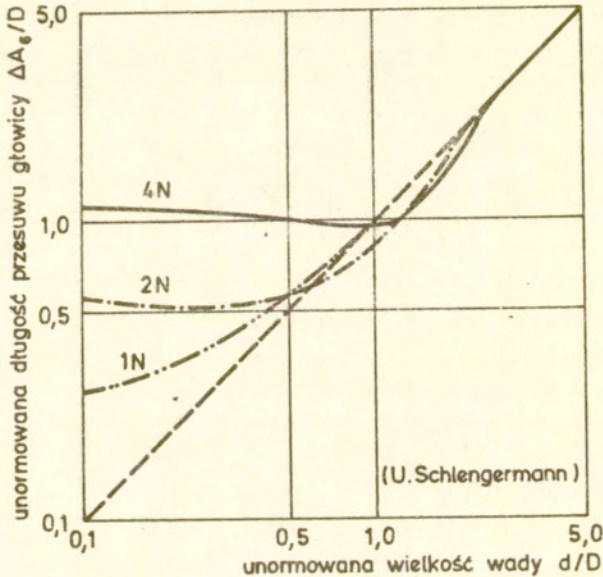
Gurvič i Ščukin [3] analizowali teoretycznie i zbadali doświadczalnie dwa sposoby pomiaru wielkości wad poprzez pomiar przesuwu głowicy:

- 1 — przy spadku amplitudy echa o pewną wielkość od wartości maksymalnej /długość przesuwu przy względnym progu rejestracji/,
- 2 — przy spadku amplitudy echa do pewnej stałej wartości /długość przesuwu przy stałym progu rejestracji/.

Badając długości wad spoin pierwszym sposobem autorzy stwierdzili liniowy wzrost długości przesuwu głowicy ze wzrostem odległości pomiędzy głowicą a wadą. Dla tych samych wad mierzonych drugim sposobem uzyskali nieliniową zależność długości przesuwu od odległości oraz stwierdzili silny wpływ tłumienia fal w materiale i przyjętego poziomu odniesienia na długość przesuwu głowicy.

W 1973r Schlengermann [4] przedstawił niemonotoniczną zależność długości przesuwu ΔA_0 /przy spadku amplitudy echa o 6dB/ od wielkości wady, dla różnych odległości pomiędzy przetwornikiem a wadą. Średnice płaskich wad obejmowały zakres od 0,1 do 5 średnic przetwornika głowicy. Zależności te, pokazane na rys.3, posiadają minima, wyraźnie widoczne dla większych odległości przetwornik-reflektor i małych wad. Autor stwierdził również, że niezależnie od wielkości wady, dla odległości przetwornik-wada większych od trzech długości

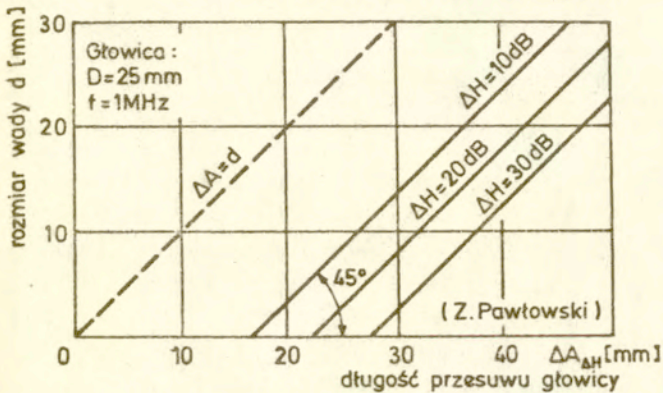
pola bliskiego przetwornika, długość przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o 6dB monotonicznie rośnie ze wzrostem wielkości wady.



Rys.3. Zależność długości przesuwu głowicy od wielkości wady dla różnych odległości pomiędzy głowicą a wadą w/g [4]
D - średnica przetwornika, N - długość pola bliskiego, d - średnica wady.

Wyniki modelowych pomiarów krzywych $H(A)$ dla płaskich wad, przeprowadzonych metodą zanurzeniową dla różnych spadków amplitudy echa wady przedstawił w 1974r Jočev [5]. Stosując głowice normalne generujące w wodzie słabo rozbieżne wiązki i prowadząc badania w ograniczonym zakresie odległości przetwornik-wada przy spadku amplitudy echa o 6dB, autor stwierdził zgodność długości przesuwu głowicy z wymiarami płaskich, kołowych reflektorów o różnych średnicach, niezależnie od odległości. Dla większych niż 6dB spadków amplitudy echa uzyskał stałą, niezależną od odległości wartość poprawki.

Podobne, zależne od wielkości przetwornika i spadku amplitudy echa wady wartości poprawek b_s przedstawił Pawłowski [6]. Autor wiąże wartość poprawki z charakterystyką pola głowicy i stwierdza możliwość oceny metodą PP, przy stosowaniu poprawek, wielkości wad małych, rzędu kilku milimetrów zarówno w polu bliskim jak i dalekim głowicy /rys.4/.



Rys.4. Zależność długości przesuwu głowicy od wielkości wady dla różnych spadków amplitudy echa w/g [6].

Zanurzeniowe badania wpływu kształtu i chropowatości powierzchni wady na krzywą $H(A)$ przeprowadzili Silk i Lidington [7]. Autorzy zauważyli, że wzrost chropowatości powierzchni wady powoduje wzrost długości przesuwu głowicy niezależnie od przyjętego spadku amplitudy echa oraz, że wpływ ten jest silniejszy dla wad wypukłych niż dla płaskich. Do innych wniosków co do wpływu chropowatości powierzchni odbijającej na krzywą $H(A)$, stosując prawdopodobnie reflektory o znacznie większych chropowatościach niż Silk i Lidington, doszli Schlengermann i Frielinghaus [8]. Autorzy wprowadzili również podział wad na duże, taśmowe i małe w zależności od ich długości i szerokości w stosunku do średnicy wiązki fal ultradźwiękowych w odległości wady. Na podstawie praktycznych doświadczeń w ocenie wielkości naturalnych

wad materiałów stwierdzili lepszą dokładność pomiarów przy spadku amplitudy echa wady o wartości większe niż 6dB /np. 20dB/. Autorzy przeprowadzili też analizę błędów popełnianych przy ocenie wielkości wad dużych, liniowych i małych metodą PP.

Dymkin i Comuk [9] przeprowadzili analizę błędów popełnianych przy ocenie wysokości wad spoin głowicami skośnymi, badając krzywe $H(A)$ przy spadku amplitudy echa do zadanej wartości. Podobne badania na wadach sztucznych wykonał Čogorinskij [10]. Autor analizował możliwość oceny wielkości i rodzaju wady /płaska, cylindryczna, sferyczna/ metodą PP. W pracy porównano wyniki oceny wielkości wad metodą PP z oceną tych samych wad metodą OWR i wykazano większą dokładność metody PP.

Inne podejście do oceny wielkości wady na podstawie zależności amplitudy echa od położenia głowicy zaproponowali Wüstenberg, Kutzner i Kaps [11]. Do badań autorzy zastosowali głowice generujące silnie rozbieżne wiązki i impulsy o długim czasie trwania. W krzywych $H(A)$ mierzyli nie długości przesuwu głowicy a poszukiwali ekstremów wywołanych odbiorem kolejno listka głównego i następnie listków bocznych wiązki odbitej od wady, przy czym założono, że wada jest płaska lub posiada płaskie fragmenty. Autorzy zaproponowali tę metodę do rozróżniania wad płaskich od objętościowych.

W tym samym czasie Nardoni i Berzolla [12] badali długości przesuwu głowicy uzyskane na wadach spoin przy wysokich spadkach amplitudy echa /22 i 32dB/. Autorzy zastąpili płaskie, chropowate wady naturalne szeregiem blisko siebie umieszczonych otworów cylindrycznych. W ujęciu autorów, krzywą $H(A)$ wady naturalnej można zastąpić sumą krzywych $H(A)$ poszczególnych otworów. Badania doświadczalne przeprowadzone na tak przygotowanych wadach sztucznych potwierdziły przewidywania autorów, nie porównano jednak wyników z pomiarami rzeczywistych, ciągłych wad.

Curvič i Kuzmina [13] wykorzystali krzywą $H(A)$, uzyskaną głowicą skośną o znanej charakterystyce kierunkowości do wyznaczenia unormowanej charakterystyki wady. W zależności od tej charakterystyki autorzy oceniali kształt i wielkość

wady. Wprowadzili również charakterystykę liczbową krzywych $H(A)$ /liczba maksimów, współczynnik formy/ i zbudowali zbiór typowych krzywych powiązanych z określonymi rodzajami wad. Autorzy zaproponowali też zastosowanie do oceny wad głowic ultradźwiękowych o zmiennych charakterystykach kierunkowości. Podobne rozwiązanie techniczne przedstawił Čogorinski [14] opisując głowicę przeznaczoną do pomiarów wielkości wad metodą PP. Szerokość wiązki tej głowicy może być regulowana w zależności od odległości pomiędzy głowicą w wadą. Autor przeprowadził badania doświadczalne na małych wadach sferycznych mierząc długości przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa do stałej wartości.

Precyzja pomiaru wielkości wady metodą PP podniesiona może być poprzez zastosowanie w badaniach głowic generujących w materiale wąskie wiązki fal ultradźwiękowych, wiązki zogniskowane lub głowic podwójnych o wąskich strefach czułości. Liczne prace przedstawiają takie głowice służące do oceny wielkości wykrytych już wad.

Murphy [15] opisał zastosowanie soczewek toroidalnych w głowicach normalnych i skośnych. Burckhard i współautorzy [16] przedstawili budowę axiconu do wykrywania i oceny wielkości małych wad w tworzywach sztucznych. Weight [17] opisał budowę głowicy z płaskim przetwornikiem z wytłumioną częścią centralną a Szelażek [18] przedstawił zastosowanie głowicy skośnej z ogniskiem liniowym do oceny długości i powierzchni wad spoin. Szerokie możliwości zarówno przy wykrywaniu jak i ocenie wielkości wad stwarzają odpowiednio sterowane głowice wieloelementowe, opisane przez Hosseiniego i współautorów [19]

Metoda PP wykorzystywana jest w wielu zautomatyzowanych stanowiskach do badań ultradźwiękowych. w pracach [20] i [21] Hullin i współautorzy opisali zautomatyzowany system oceny wielkości płaskich, równoległych do powierzchni badania wad /wady typu rozwarstwień/ w elementach walcowanych. Wady oceniane są metodą PP przy spadku amplitudy echa do stałej wartości, przyjętej jako poziom echa idealnej wady płaskiej o średnicy 2 mm. Długość wady obliczana jest jako długość przesuwu głowicy pomniejszona o poprawkę zależną od maksymal-

nej amplitudy echa wady i odległości pomiędzy głowicą a wadą. Przedstawiony przez autorów sposób oceny rozmiarów wad wiąże niejako metodę PP z możliwością oceny małych, płaskich wad metodą OWR.

Inne powiązanie obu metod przedstawił Meyer i współautorzy w pracy [22] przy ocenie długości i szerokości wąskich, podłużnych wad występujących w wirnikach turbin /czyli wad taśmowych według [8]/. Metodę PP autorzy wykorzystują do pomiaru długości wady, przy czym zakłada się, że długość ta jest większa niż średnica wiązki fal, a zmodyfikowaną metodę OWR stosują do oceny szerokości wady.

W przypadkach gdy oceniane wady posiadają powtarzalne wielkości i kształty, jak to się dzieje na przykład przy automatycznym spawaniu rur, krzywe $H(A)$ wykorzystane mogą być do rozróżniania typu wady. Ultraźwiękowy atlas wad spoin zaprezentowali Szelażek i Pawłowski [23]. Dla przedstawionego w pracy zbioru wad naturalnych możliwe okazało się rozróżnianie typu i przybliżona ocena głębokości zalegania wady w przekroju spoiny. Analiza krzywych $H(A)$ uzyskanych na tych wadach wykazała natomiast nieprzydatność metod OWR i PP do oceny wysokości wad, co przedstawił Szelażek w pracy [24]. Ogólne wskazówki wykorzystania kształtu krzywej $H(A)$ do wyznaczenia typu wady przedstawione są w dokumencie [25]. Krzywe $H(A)$ uzyskane głowicami skośnymi podzielone są w nim na trzy charakterystyczne grupy, którym przypisane są określone typy wad.

Gaugblauer i współautorzy [26] na podstawie badań wad sztucznych o różnych wielkościach i kształtach /płaskie, wklęsłe, wypukłe/ zbudowali atlas krzywych $H(A)$ wad sztucznych. Na podstawie zmian kształtu krzywej /prędkość narastania, prędkość opadania, długość plateau itp./ autorzy stwierdzili możliwość oceny kształtu wady.

Opisane powyżej prace oparte są głównie na wynikach badań doświadczalnych przeprowadzonych na różnego typu wadach sztucznych i naturalnych, w elementach stalowych lub zanurzeniowo, gdzie wadę zastępowano metalowym reflektorem. Drugą grupę stanowią prace opisujące rachunkowe lub numerycz-

ne wyznaczanie przebiegu krzywych $H(A)$. Obliczenie amplitudy echa reflektora i dalej krzywej $H(A)$, sprowadza się do wyznaczenia pola akustycznego generowanego w materiale przez przetwornik, pola fali odbitej od reflektora i ciśnienia akustycznego tego pola na powierzchni przetwornika głowicy, pełniącego z kolei rolę odbiornika. Dla reflektorów o wymiarach zbliżonych do wielkości przetwornika i położonych w polu dalekim przetwornika możliwe jest założenie, że fala padająca na reflektor, jak również odbita od niego fala padająca na przetwornik, są falami płaskimi a ciśnienia akustyczne fal są stałe na powierzchni reflektora i przetwornika [27,28,29,31,32,33,34,35]. W takich przypadkach amplituda echa wady jest proporcjonalna do iloczynu charakterystyki kierunkowości reflektora i kwadratu charakterystyki kierunkowości przetwornika nadawczo-odbiorczego.

W sytuacji gdy wymiar reflektora jest porównywalny do szerokości padającej nań wiązki fal lub też gdy duży przetwornik znajduje się w polu bliskim wiązki fal odbitych od wady, przedstawione powyżej założenia nie są spełnione. Pole dyfrakcyjne fal wypromieniowanych przez reflektor obliczane jest wtedy w oparciu o zasadę Huygensa a amplituda echa wady wyznaczana jest jako sumaryczne ciśnienie fal na powierzchni przetwornika [38,45,46,47,49].

Obliczenia amplitud ech małych, płaskich wad wykrywanych głowicami skośnymi, metodą tandem /rozdzielone głowice nadawcza i odbiorcza/ przedstawił Obrab [27]. Autor badał wpływ nachylenia takich wad na długości przesuwu głowic. W pracy [28] Deputat przedstawił analityczne wyrażenie na długości przesuwu głowicy dla wady wykrywanej głowicą skośną, przemieszczaną w kierunku prostopadłym do osi wiązki fal. Długość przesuwu głowicy jest zależna od parametrów głowicy, prędkości propagacji fal w badanym materiale, położenia i wielkości reflektora. Autor zastosował uproszczony opis charakterystyki kierunkowości wiązki fal głowicy i wady. Wyniki badań rachunkowych potwierdzone są doświadczalnie. W pracy przeprowadzono też badania wartości poprawek b_3 przy pomiarach długości przesuwu głowicy dla spadków amplitudy

echa o 20dB. Autor zwrócił uwagę na zależność wartości poprawki od odległości pomiędzy głowicą a wadą oraz od kształtu krawędzi wady.

Obliczenia obszarów pola głowicy, w których amplituda echa określonej, małej wady idealnej przewyższa pewien poziom /tzw. obszary skuteczne pola/ przedstawił Szelażek [29,30]. Szerokości tych obszarów odpowiadają długościom przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa do zadanej wartości. W pracach przedstawiono wpływ parametrów głowicy i badanego materiału na wielkości obszarów skutecznych.

Analizę wykrywalności małych, płaskich wad leżących w polu dalekim głowicy przeprowadził Serabian [31]. Autor obliczając krzywe $H(A)$ poszukiwał położenia głowicy, którym odpowiada maksymalna amplituda echa wady. Przedstawił zależność amplitudy echa od kąta nachylenia wady i wielkości przetwornika głowicy. Stwierdził, że metodą PP, przy użyciu głowic skośnych generujących fale poprzeczne, oceniać można jedynie wady znacznie większe od wielkości przetwornika. Autor nie określił jednak zakresu odległości pomiędzy głowicą a wadą. Zwrócił natomiast uwagę na różnice w wymaganiach jakie powinno się stawiać głowicom przeznaczonym do wykrywania i oceny wielkości wad.

W innej pracy [32] Serabian przedstawił wyniki badania wad małych, nachylonych, wykrywanych dwiema głowicami, z których jedna generuje wiązkę fal prostopadle do powierzchni materiału a druga pod pewnym kątem. Z położenia głowic, w których uzyskuje się maksymalne amplitudy ech oraz kąta załamania jednej z głowic, autor uzyskał możliwość jednoznacznego określenia średnicy i nachylenia wady.

Analizę krzywych $H(A)$ obliczonych dla małych, płaskich wad wykrywanych głowicą normalną generującą krótki, szerokopasmowy impuls ultradźwiękowy przeprowadzili Serabian oraz O'Callahan [33]. W pracy autorzy uwzględnili zmiany widma impulsu w wiązce fal wysyłanych przez przetwornik i odbitych od reflektora.

Rachunkowe badania obszarów wykrywalności małych, płaskich wad metodą tandem prowadzili Walte i współautorzy [34] oraz

Ščerbinskij i Bielyj [35].

Inna grupa prac opisuje obliczenia zależności amplitudy echa od położenia głowicy dla małych, płaskich wad położonych w pobliżu powierzchni ograniczających materiał tak, że powierzchnia ta bierze również udział w powstawaniu echa wady. Werneyer i Schlengermann [36] badali krzywe $H(A)$ obliczane dla płaskich nacięć o różnych głębokościach i nachyleniach. Podobne obliczenia wykonał Ammirato [37] dla wad usytuowanych w pobliżu powierzchni płyty. Autor założył prostokątny kształt impulsu ultradźwiękowego a obliczenia prowadził dla poszczególnych składowych widma częstotliwości przyjętego impulsu. Celem prac [36] i [37] było modelowanie zjawiska odbicia rozbieżnej wiązki fal poprzecznych od wad sztucznych. Wady te służyć miały do skalowania czułości badania prowadzonego głowicami skośnymi.

Następne przytoczone prace przedstawiają numeryczne modelowanie odbicia rozbieżnej wiązki fal od reflektorów o większych w stosunku do szerokości wiązki rozmiarach. Autorzy tych prac wprowadzają podział powierzchni wady na szereg elementów, które działają jak źródła punktowe, liniowe lub generujące wiązki fal o charakterystykach zależnych od kierunku fali padającej i wymiaru elementu. Baborovsky, Marsh i Slatter [38] przedstawili numeryczny model odbicia płaskiej fali poprzecznej od prostokątnego naroża utworzonego przez powierzchnię materiału i płaskie nacięcie o określonej wysokości. W płaskim modelu nacięcie podzielone zostało na szereg elementów będących źródłami fal walcowych. Autorzy przeprowadzili badania pola fali odbitej dla określonego kształtu impulsu fali padającej, uwzględniając transformację fal na powierzchni materiału, tłumienie fal w ośrodku oraz porównali wyniki obliczeń z obrazami uzyskanymi metodą wizualizacji odbicia impulsu w szklanej próbce. Rose i Meyer [39] przeprowadzili porównania obliczonego pola akustycznego przetwornika lub reflektora, w polu dalekim, dla fali ciągłej i impulsów o krótkich czasach trwania. Autorzy zwrócili uwagę na możliwości doboru kształtu impulsu

dla uzyskania optymalnej wykrywalności określonych wad. Glagoliev i Martynienko [40] przedstawili porównanie obliczeń ciśnienia akustycznego pola płaskiego, drgającego tłokowo źródła, prowadzonych przy różnych przybliżeniach od ścisłego rozwiązania Kirchhoffa do przybliżenia fali płaskiej. Autorzy podali obszary stosowalności poszczególnych przybliżeń. Przedstawione w pracy obliczenia wykonane były dla fali ciągłej.

Singh i Rose [41] badali przestrzennie pole przetwornika stanowiącego zespół źródeł punktowych generujących fale kuliste, pobudzanych impulsami o różnych przebiegach i rozkładach amplitud. Autorzy stwierdzili, że krytycznym punktem modelu jest wielkość elementów, na jakie podzielono płaskie źródło. Dla badań w polu bliskim optymalna odległość pomiędzy źródłami punktowymi wynosi od $1/6$ do $1/8$ długości fali.

W pracach [42] i [43] /oraz w serii interesujących filmów szkoleniowych/ Harumi przedstawił komputerowe modelowanie propagacji i odbicia fal podłużnych na reflektorach o prostej geometrii. Autor stosuje metodę elementów skończonych i krótkie czasy trwania impulsów.

Modelowanie pola głowicy skośnej, w której przetwornik piezoelektryczny umieszczony jest na klinie załamującym, przedstawili Fukuhara i Saito [44]. Autorzy uwzględnili tłumienie fal w materiale klina i uzyskali zgodność wyników obliczeniowych z pomiarami wykonanymi metodą echa na małych, idealnych wadach sztucznych.

W pracy [45] opisującej wykrywanie dużych, płaskich i nachylonych wad spoin metodą tandem, Kutzner i współautorzy przyjęli model obliczeniowy z podzielonym na elementy reflektorem i punktowymi modelami głowic nadawczej i odbiorczej.

Podobne założenia punktowego modelu głowicy nadawczo odbiorczej przyjęli Erhard, Kutzner i współautorzy [46] modelując odbicie wiązki fal poprzecznych od podzielonego na elementy nacięcia. Autorzy w obliczeniach uwzględnili czas trwania impulsu i poprzez odniesienie obliczonych krzywych $H(A)$ do

charakterystyki kierunkowości głowicy, wyznaczyli charakterystyki kierunkowości wad.

Podsumowanie prac [45] i [46] dokonał zespół Wulstenberg, Engl i Kutzner [47]. Autorzy stwierdzili, że w stosowanym modelu obliczeniowym /wada płaska, nachylona, podzielona na elementy/ chropowatość powierzchni reflektora mniejsza niż połowa długości fali nie ma wpływu na kształt krzywej $H(A)$.

W prowadzonych obliczeniach autorzy prac [45], [46] i [47] przyjmowali określony czas trwania i prostokątny kształt impulsu.

W pracy [48] Szelażek, stosując punktowy model głowicy nadawczej, podzielonego na nieskończenie długie taśmy reflektora i przetwornika głowicy odbiorczej, przedstawił wyniki modelowania krzywych $H(A)$ wad spoin uzyskanych głowicą skośną. W pracy uwzględniono impulsy jedno- i dwukrotnie odbite od górnej i dolnej powierzchni płyty, a do obliczeń przyjęto wyznaczone doświadczalnie kształt impulsu i charakterystykę kierunkowości głowicy.

W 1983r Walte i Müller [49] zaprezentowali wyniki modelowania generacji, ogniskowania, odbicia od dowolnego reflektora i odbioru wiązki fal podłużnych. Obliczenia prowadzone były jako sumowanie fal źródeł punktowych leżących kolejno na powierzchni przetwornika, soczewki akustycznej, reflektora, ponownie soczewki i przetwornika. Autorzy znaleźli bardzo silny wpływ chropowatości reflektora badanego zogniskowaną wiązką na kształt krzywej $H(A)$. Wpływ ten nie został potwierdzony doświadczalnie a stosowany model obliczeniowy wymaga wykorzystania maszyn o poważnych mocach obliczeniowych.

Nieliczne prace opisują modelowanie wpływu bocznej powierzchni materiału na kształt krzywych $H(A)$ wad usytuowanych w pobliżu tej powierzchni i wykrywanych głowicami normalnymi na fale podłużne.

Wpływ bocznej ściany na amplitudę echa reflektora nieskończenie wielkiego, płaskiego, ustawionego prostopadle do osi wiązki fal /tzw. amplituda echa dna/ obliczyli Rachimov, Gorodkov i współautorzy [50]. Celem pracy było wyznaczenie

minimalnej odległości pomiędzy głowicą a ścianą boczną, dla której amplituda echa takiego reflektora nie jest przez boczną ścianą zakłócana.

W pracy [51] Gorodkov i współautorzy zbadali wpływ bocznej ściany na amplitudę echa małej, idealnej wady usytuowanej w pobliżu ściany. Autorzy założyli dzwonowy kształt impulsu ultradźwiękowego i dla różnych parametrów głowicy wyznaczyli odległości pomiędzy głowicą a ścianą, dla których obserwowany jest jeszcze wpływ ściany bocznej na amplitudę echa wady. Badania doświadczalne przeprowadzono metodą zanurzeniową a modelem bocznej ściany była swobodna powierzchnia cieczy. Wpływ bocznej ściany na zmianę kształtu kolejnych ech obserwowanych w płaskorównoległej płycie i wywołane nim mierzone zmiany czasów przejścia impulsów przedstawili Kwaszczyńska-Klimek i Szelażek w pracy [52]: Autorzy uzyskali zgodność wyników obliczeń i pomiarów przeprowadzonych na stalowych próbkach i zwrócili uwagę na wyraźną zależność mierzonych zmian od kształtu impulsu.

2.2. Inne metody oceny wielkości wad

Drugą prostą i również powszechnie stosowaną metodą oceny wielkości wad jest metoda OWR wiążąca wielkość wady, amplitudę echa i odległość pomiędzy głowicą a wadą.

Metoda wykorzystuje jedynie maksymalną wartość amplitudy echa wady a w wyniku jej stosowania uzyskuje się średnicę wady równoważnej / tzn. płaskiej wady kołowej, ustawionej prostopadle do osi wiązki fal, o współczynniku odbicia fal równym 1/.

Uniwersalny wykres OWR dla głowic normalnych na fale podłużne, posiadających okrągłe przetworniki przedstawił Krautkrämer [53] a badania zależności dla głowic z przetwornikami prostokątnymi przeprowadzili Marini i Rivenez [54].

Ermolov i Ščerbinskij obliczyli zależność OWR dla głowic skośnych generujących fale poprzeczne [55].

Schlengermann [56] zaproponował wykres OWR oprty o reflektory

w postaci cylindrycznych otworów o osiach prostopadłych do kierunku propagacji fal ultradźwiękowych.

Wykorzystanie takich reflektorów wzorcowych zalecają też autorzy Polskiej Normy [57], choć dalej obliczenia wielkości wady prowadzone są jak dla idealnych wad płaskich.

Szereg prac poświęconych jest ograniczeniom metody [58], [59], [60] a szczególnie ocenie granicznej wielkości wady, która może być tą metodą oceniana [61].

Stosowanie metody OWR wymaga uwzględniania przy pomiarze amplitudy echa wpływu tłumienia fal w badanym materiale oraz strat przeniesienia związanych z nierównościami powierzchni materiału i warstwą cieczy sprzęgającej. Są to wielkości trudne do zmierzenia lub oszacowania. Między innymi z tych samych powodów pomiar długości przesuwu głowicy w metodzie PP przy spadku amplitudy echa do stałej, zadanej wartości /metoda opisana w pracach [3], [9] / choć z teoretycznego punktu widzenia ciekawszy [62], w praktyce nie znalazł zastosowania.

Postępy w dziedzinie elektroniki umożliwiły szybki rozwój innych metod oceny wielkości wad, wymagających zastosowania bardziej skomplikowanej aparatury. Do oceny rodzaju wad zastosowana została analiza widmowa. Gericke [63] przedstawił wyniki badań wad sztucznych tą metodą a Seiger i Wagner [64] zaprezentowali możliwości wykorzystania zmian widma impulsu odbitego od wady obserwowanych podczas przesuwu głowicy do rozróżniania wad płaskich od objętościowych. Te same cele osiągnął Newbold [65] badając nie widmo a jedynie zmiany czasu narastania, opadania i czasu trwania impulsu.

Do oceny głębokości pęknięć wykorzystano pomiary czasu przejścia fal dyfrakcyjnych [66], [67] a dla wad objętościowych czasu przejścia fal obiegowych /creeping waves/ [68], [69]. Autorzy tych prac zwracają uwagę na niską amplitudę tych fal, znacznie niższą niż amplituda fal odbitych od powierzchni wady [68], [70], [71]. Dlatego fale dyfrakcyjne wykorzystywane są często w przypadkach, gdy fale odbite nie docierają do przetwornika odbiorczego [72], [73]. Metody oparte o pomiary czasu przejścia fal służą jedynie do oceny wielkości wykrytych już

wad i wymagają zachowania stałego, powtarzalnego sprzężenia akustycznego głowic z badanym materiałem [68] .

Metodą umożliwiającą uzyskanie wysokiej rozdzielczości poprzecznej i wyznaczanie rozmiarów wad jest SAFT /synthetic aperture focusing technique/. Petersen i współautorzy [75] opisali w 1982r. zastosowanie działającego w czasie rzeczywistym układu do badania płaskich wad głowicą wieloelementową a Burch i Burton [76] oraz Thompson [77] przedstawili wyniki prac nad poprawą rozdzielczości metody.

Barabian, Grohs i współautorzy [78] [79] wykorzystali do rekonstrukcji przekroju wady zmiany amplitudy i czasu przejścia impulsu mierzone podczas ruchu głowicy. Metodą ALOK /Amplitude-Laufzeit-Ortskurve/ autorzy zbadali szereg wad sztucznych usytuowanych w oddaleniu lub w pobliżu powierzchni ograniczających badany materiał.

Gebhardt i współautorzy [80] zastosowali do badania głowicę generującą w materiale szeroką wiązkę, eliminując tym wpływ charakterystyki kierunkowości głowicy na amplitudę echa wady. Stosując metodę VAOK /compoun scan amplitude locus curve/ uzyskali możliwość rekonstrukcji przekroju wady. Wüstenberg, Haufe i Erhard [81] przedstawili zastosowanie holografii ultradźwiękowej do oceny wysokości i kierunku pęknięć.

W roku 1978 McNab i Muir [82] dokonali przeglądu stosowanych w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących metod oceny wielkości wad. Na pierwszym miejscu co do zakresu zastosowań autorzy wymienili metody OWR i PP przy spadku amplitudy echa o określoną wartość /6, 10 i 20dB/. Autorzy zwrócili uwagę na brak informacji o ograniczeniach i możliwościach różnych metod oceny wielkości wad.

Przeglądu metod oceny różnego rodzaju pęknięć dokonali Holler i współautorzy [83] oraz Doyle i Scala [84] . Autorzy tych prac wykazali przewagę metod opartych na pomiarach czasu przejścia podłużnych fal dyfrakcyjnych a nowe metody /SAFT, ALOK, VAOK, holografia/ zaliczyli do metod laboratoryjnych.

2.3. Praktyczne zastosowania metody PP

Prowadząc badania ultradźwiękowe powszechnie stosowaną aparaturą, metodą echa, badający uzyskuje dwie informacje o wykrytej wadzie: amplitudę echa wady oraz czas przejścia impulsu na drodze przetwornik-wada-przetwornik, dla różnych położenia głowicy względem wady. Dane te pozwalają na zastosowanie metody OWR, metody PP oraz na wyznaczenie z ograniczoną dokładnością zmian czasu przejścia impulsu. Dokładność tę ograniczają stosowane w defektoskopach zakresy obserwacji impulsów na ekranie lampy oscyloskopowej, przydatne przy wykrywaniu i lokalizacji wad.

Zastosowanie metody OWR wymaga uwzględnienia wpływu tłumienia, strat przeniesienia oraz znajomości długości pola bliskiego głowicy, czyli znajomości prędkości propagacji fal w badanym materiale. Często w praktyce są to parametry niemożliwe do wyznaczenia. Metoda ta nie daje również odpowiedzi na pytanie czy wykryta wada jest dostatecznie „mała” aby oceniać jej wielkość metodą OWR.

Metoda PP, przy spadku amplitudy echa do względnego progu rejestrowalności, wykorzystuje jedynie zmiany amplitudy echa. Jej wynik nie jest więc zależny od tłumienia fal ani strat przeniesienia /pomijając wpływ lokalnych zmian sprzężenia akustycznego podczas przesuwu głowicy/. W literaturze podawane są różne ograniczenia wielkości wad, które mogą być metodą PP oceniane. Autorzy licznych prac sygnalizują możliwość znacznego przeceniania wielkości małych wad metodą PP i aby uniknąć takich pomyłek proponują pomiar długości przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa do stałej wartości. Rozwiązanie to wprowadza jednak do metody PP wszystkie wady metody OWR.

Dobrym przykładem różnej oceny możliwości metody PP są normy techniczne podające skrótowo przepisy postępowania i zakresy zastosowania metody PP. Autorami norm są zazwyczaj autorzy cytowanych w pracy publikacji poświęconych ocenie wielkości wad.

Polska Norma [57] zaleca stosowanie metody PP do pomiaru długości wad spoin i niezależnie od odległości pomiędzy głowicą a wadą wprowadza podział wad na punktowe /o długości mniejszej od średnicy przetwornika/ i ciągłe. Stwarza to możliwość znacznego przecenienia długości niektórych wykrytych wad.

Norma niemiecka [85] proponuje stosowanie metody PP przy spadku amplitudy echa o 6dB do oceny wysokości wad spoin, bez ograniczeń na wielkość wady czy grubość złącza. Do pomiaru długości wad większych niż szerokość wiązki fal, norma zaleca natomiast stosowanie metody PP przy spadku amplitudy do stałej wartości, zależnej od grubości złącza. Uzależnia to wynik pomiaru od tej grubości.

Brytyjska norma [86] dopuszcza stosowanie metody PP przy spadku amplitudy o 6dB tylko dla wad większych od średnicy wiązki fal. Dla innych wad dopuszcza wykorzystanie metody PP przy spadku amplitudy o 20dB, opartą na doświadczalnym pomiarze poprawki b_s na wadzie sztucznej.

Projekt Polskiej Normy [87] przewiduje zastosowanie metody PP zarówno do pomiaru długości jak i wysokości wad spoin. Wady powinny być jednak dłuższe lub wyższe niż średnica wiązki fal ultradźwiękowych.

Żadna z przedstawionych powyżej norm nie wskazuje w jaki sposób ocenić czy wykryta wada jest większa od średnicy wiązki fal.

Norma ASTM [88] zaleca do pomiaru długości wad spoin metodę PP przy spadku amplitudy echa do stałej wartości, przyjętej jako poziom echa wady granicznej.

Norma czeska [89] wprowadza przy stosowaniu metody PP, przy spadku amplitudy echa o 6dB, poprawkę, której wartość zależy od odległości pomiędzy głowicą a wadą oraz rozbieżności wiązki fal generowanych w materiale przez głowicę.

Branżowa norma polska [90][91] określa minimalną długość przesuwu głowicy, przy której wada oceniana może być metodą PP z 6-cio decybelowym spadkiem amplitudy echa. Długość ta, podobnie jak w normie [89], zależy od odległości i rozbieżności wiązki fal.

Podejście przedstawione w dwóch ostatnich pracach zabezpiecza przed przecenieniem wielkości małej wady ale jednocześnie stwarza niebezpieczeństwo niedoceny wielkości dużej, płaskiej wady leżącej w znacznej odległości od przetwornika.

W praktyce, w czasie badania niektórych elementów, odpowiedź na pytanie o wielkość wykrytej wady często równoważna jest z podjęciem decyzji o dopuszczeniu badanego elementu do dalszej pracy lub o jego naprawie. Może to pociągać za sobą znaczne konsekwencje ekonomiczne /np. unieruchomienie całego zespołu energetycznego/.

Częst też, ze względu na konstrukcję i możliwości dostępu do badanego elementu, jedyną możliwą do zastosowania aparaturą jest przenośny defektoskop z zespołem różnych głowic ultradźwiękowych a uzyskane o wadzie informacje umożliwiają wykorzystanie prostych metod oceny wielkości wady jak OWR lub PP.

2.4. Wnioski wynikające z aktualnego stanu wiedzy

Ogólnie wspomniane wyżej prace dotyczące oceny wielkości wad metodą PP podzielić można na dwie grupy. Jedną z nich zajmuje się pomiarami wad wykrywanych głowicami normalnymi, gdzie podczas przesuwu głowicy wada przemieszcza się względem wiązki fal w kierunku prostopadłym do osi tej wiązki. Druga grupa dotyczy wad wykrywanych głowicami skośnymi, gdzie podczas ruchu głowicy wada przecina wiązkę fal skośnie, pod kątem zależnym od kąta załamania głowicy.

W pracach z pierwszej grupy zaznaczona jest graniczna, minimalna wielkość wady jaka może być metodą PP oceniana. Natomiast w wielu pracach z drugiej grupy badane są tą metodą wady małe, niespełniające tych ograniczeń.

Z przedstawionego stanu zagadnienia wypływają następujące wnioski:

1. W pracach sygnalizowane są ograniczenia co do minimalnego rozmiaru wady, poniżej którego długość przesuwu głowicy

nie jest proporcjonalna do jej wielkości. Graniczna wielkość reflektora podawana jest przez jednych autorów jako wielkość przetwornika, przez innych jako szerokość wiązki fal generowanych przez przetwornik a więc zależna od odległości pomiędzy głowicą a wadą.

Autorzy nie podają w jakim zakresie odległości kryteria te obowiązują.

Przyjęcie pierwszego, wymienionego powyżej ograniczenia prowadzić może do zawyżenia wielkości wady. Przyjęcie drugiego - ogranicza możliwości metody lub też przy dodatkowym narzuceniu warunku na minimalną długość przesuwu głowicy, związaną jedynie z charakterystyką kierunkowości głowicy /jak w normie [89] /prowadzić może do niebezpiecznego zaniżania wielkości dużych, płaskich wad.

2. W cytowanych pracach nie poruszany jest problem wpływu powierzchni ograniczających badany materiał na kształt krzywych $H(A)$ dla wad leżących w pobliżu takich powierzchni lub rozpoczynających się od nich, przy badaniu wad głowicami normalnymi na fale podłużne. Wady takie są jednak metodą PP badane i oceniane. Wiadomo też z doświadczeń praktycznych, że w pewnych warunkach wpływ powierzchni ograniczającej prowadzić może do błędnej lokalizacji i oceny wielkości wady. Nieznana jest również graniczna wielkość tak usytuowanej wady, która może być metodą PP oceniana.
3. Ogólnie, stawiane przez autorów ograniczenia odnoszą się do wielkości wady a nie do mierzonej podczas badania długości przesuwu głowicy. Tak postawione kryteria, aby stwierdzić czy wykryta wada może być oceniana metodą PP, wymagają niejako wcześniejszej znajomości wielkości wady.
4. W pomiarach wielkości wad przy spadkach amplitudy echa większych niż 6dB autorzy cytowanych prac prezentują różne sposoby wyznaczania wartości poprawek b_s . Proponowane jest uzależnienie ich wartości od charakterystyki pola akustycznego głowicy i wyznaczanie jej doświadczalnie przy pomocy małych reflektorów kulistych lub też

wyznaczanie jej na reflektorze płaskim o określonej szerokości. W pierwszym przypadku poprawki są zależne jedynie od kształtu wiązki fal, w drugim - również od charakterystyki kierunkowości wiązki fal odbitych od reflektora wzorcowego.

5. W pracach opisujących pomiary wysokości wad metodą PP przy użyciu głowic skośnych, niektórzy tylko autorzy określają graniczną wielkość wady [92] [93] [94]. Przez innych problem ten jest pomijany a metoda PP stosowana niezależnie od wielkości wady.

Brak jest również informacji jak zależą możliwości metody PP przy wyznaczaniu wysokości wad od kąta załamania głowicy skośnej.

3. CEL I ZAKRES PRACY

Głównym celem pracy jest znalezienie metody bardziej dokładnego pomiaru rozmiarów nieciągłości materiałów na podstawie obserwowanych podczas przesuwu głowicy zmian amplitudy impulsu odbitego od wady. Nieciągłościami takimi są wady makrostruktury, w szczególności płaskie rozwarstwienia w wyrobach walcowanych, zakucia w elementach kutych i pęknięcia. Cel pracy realizowany jest poprzez analizę wpływu parametrów przetwornika nadawczo-odbiorczego głowicy, parametrów akustycznych ośrodka, wielkości płaskiego reflektora jakim jest wada i odległości pomiędzy przetwornikiem a wadą na długość przesuwu głowicy zmierzoną przy określonym spadku amplitudy echa. Z analizy tej wyznaczone są obszary zastosowania metody PP oraz jej możliwości przy wyznaczaniu rozmiarów wad metodą echa.

Podjęto próbę wyznaczenia zakresów zastosowania metody dla dwóch przypadków usytuowania wad wykrywanych i ocenianych głowicami normalnymi: dla wad leżących w oddaleniu od powierzchni ograniczających oraz dla wad rozpoczynających się od bocznej ściany materiału. Zaproponowano sposób różniczenia wad, które mogą być oceniane w oparciu o pomiar długości przesuwu głowicy od wad, których pomiar metodą PP nie daje jednoznacznych wyników.

W drugiej części pracy określone zostały praktyczne możliwości metody PP przy ocenie wysokości wad wykrywanych głowicami skośnymi o różnych kątach załamania, generujących w badanym materiale wiązki fal poprzecznych. Badane w pracy długości przesuwu głowicy uzyskane są przy spadkach amplitudy echa o 6, 10 i 20dB czyli odpowiednio do 50, 32 i 10% amplitudy maksymalnej. Są to spadki najczęściej stosowane w praktyce badań ultradźwiękowych.

Istnieją dwa ograniczenia odległości pomiędzy głowicą a wadą. Pierwszym jest możliwość wykrycia wady w czasie badania. Zmniejsza się ona ze wzrostem odległości wskutek spadku amplitudy echa wady wywołanego rozbieżnością wiązki i tłumieniem fal w badanym materiale. Drugim ograniczeniem

są praktyczne potrzeby defektoskopii ultradźwiękowej związane z wymiarami kontrolowanych elementów. W pracy przyjęto, że maksymalna odległość pomiędzy głowicą a reflektorem wynosi w przybliżeniu 15 długości pola bliskiego wiązki fal generowanych w ośrodku przez przetwornik. Odległość ta odpowiada spadkowi ciśnienia akustycznego echa dna /nieskończenie wielkiego, płaskiego reflektora ustawionego prostopadle do osi wiązki fal/ do około 10% wartości maksymalnej. Echo reflektora idealnego o średnicy równej 0,2 średnicy przetwornika spada w tej odległości do około 1% wartości maksymalnej.

Długości pól bliskich stosowanych w defektoskopii ultradźwiękowej głowic wynoszą w stali od około 4 mm /głowica typu 2LN7/ do około 100 mm /głowica 4LO⁰25C/. Rozpatrywany w pracy zakres odległości, w zależności od typu głowicy, obejmuje więc odległości od 60 mm do 1,5 m w stali i odpowiada większości spotykanych w praktyce potrzeb.

Zakres rozpatrywanych wielkości wad obejmuje reflektory o wielkościach od 0,15 wymiaru przetwornika do wad dużych, wielokrotnie większych od wymiaru przetwornika.

4. OCENA WIELKOŚCI WAD METODĄ PP PRZY WYKORZYSTANIU GŁOWIC NORMALNYCH

4.1. Obliczenia zależności amplitudy echa od położenia głowicy

Dalsze rozważania prowadzone będą przy założeniach, że źródłem fal ultradźwiękowych jest drgający stempel /membrana tłokowa/ przyłożony do płaskiej powierzchni ośrodka stałego. Powierzchnia stempla /przetwornika piezoelektrycznego głowicy/ drga tłokowo, to znaczy amplituda i faza drgań są na niej jednakowe. Takie źródło generuje w ośrodku stałym zarówno impulsy fal podłużnych, poprzecznych jak i na powierzchni ośrodka fal Rayleigha.

W defektoskopii ultradźwiękowej stosuje się przetworniki, których rozmiary są duże w stosunku do długości fali w ośrodku. Można więc wprowadzić założenie upraszczające, że dzięki silnej kierunkowości źródła, różnicom w prędkości propagacji różnych typów fal i niskim ciśnieniom akustycznym fal poprzecznych i powierzchniowych, fale te można pominąć i rozpatrywać rozkład pola akustycznego jak w ośrodku płynnym [95].

W zależności od kąta padania fali podłużnej na powierzchnię wady, powierzchnia ta staje się źródłem odbitych fal podłużnych, powstających wskutek transformacji fal poprzecznych i fal dyfrakcyjnych powstających na krawędziach wady. W przypadku wad objętościowych /sfera, walec/ wokół wady rozchodzą się dyfrakcyjne fale obiegowe /creeping waves/. Zarówno odbite fale podłużne, fale poprzeczne jak i fale dyfrakcyjne mogą formować impulsy docierające do przetwornika odbiorczego i być rejestrowane jako echo wady. Jednakże ciśnienia akustyczne fal dyfrakcyjnych są znacznie niższe niż ciśnienie fali odbitej. W przypadku fal obiegowych powstających na powierzchni wady w postaci otworu o średnicy kilku milimetrów, różnica ciśnień wynosi około 40dB [68], czyli ciśnienie fali dyfrakcyjnej stanowi 1% ciśnienia fali odbitej.

Fale poprzeczne, ze względu na blisko dwukrotnie niższą prędkość propagacji niż fal podłużnych, docierają do przetwornika odbiorczego później i nie wpływają na amplitudę impulsu fal podłużnych odbitych od wady.

W związku z tym pominąć można fale dyfrakcyjne oraz fale poprzeczne i przyjąć, że nie wpływają one na amplitudę echa ani na czas przejścia impulsu fal podłużnych odbitych od wady.

Obliczanie poziomu echa wady podzielić można na trzy etapy:

- 1 — obliczanie ciśnienia akustycznego pola generowanego w badanym materiale przez przetwornik głowicy ultradźwiękowej,
- 2 — obliczanie ciśnienia akustycznego pola fali odbitej od wady,
- 3 — obliczanie amplitudy echa wady, zależnej od ciśnienia akustycznego padającej na przetwornik fali odbitej i proporcjonalnego do maksymalnej wartości napięcia sygnału elektrycznego powstającego na okładkach przetwornika podczas odbioru impulsu fali odbitej.

Obliczenia amplitudy echa dla kolejnych położeń głowicy względem wady prowadzą do uzyskania zależności amplitudy echa od położenia głowicy na powierzchni materiału, nazwanej krzywą $H(A)$.

Znając przebieg tej krzywej wyznaczyć można z kolei długości przesuwu głowicy odpowiadające określonym spadkom amplitudy echa. Obliczając czas pomiędzy momentem generacji impulsu w ośrodku a momentem odbioru impulsu odbitego od wady otrzymać można czas przejścia impulsu na drodze przetwornik-wada-przetwornik, dla poszczególnych położeń głowicy względem wady.

W zależności od wzajemnych relacji pomiędzy wielkościami przetwornika D , reflektora d i odległością Z pomiędzy nimi, rozróżnić można trzy przypadki, dla których obliczenia krzywej $H(A)$ prowadzić można przyjmując różne uproszczenia.

Przypadek 1 — wada znajduje się w polu bliskim /strefie Fresnela/ wiązki fal generowanych przez przetwornik natomiast rozkład ciśnienia akustycznego i fazy fali odbitej od wady na powierzchni

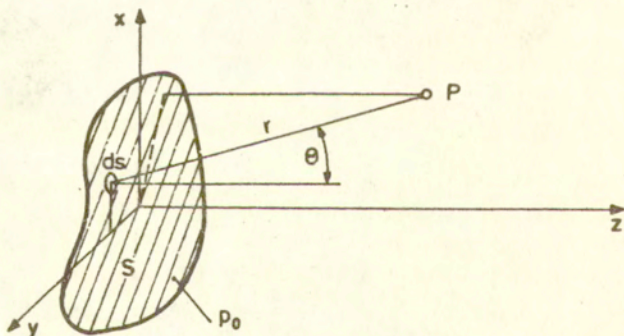
przetwornika jest nierównomierny /przetwornik znajduje się w „polu bliskim” wiązki odbitej od reflektora/,

Przypadek 2 – wada znajduje się w polu dalekim /strefie Fraunhofera/ wiązki fal przetwornika a fali odbitej, padającej na powierzchnię przetwornika, podobnie jak w Przypadku 1, nie można uznać za falę płaską.

Przypadek 3 – wada znajduje się w polu dalekim wiązki fal przetwornika zaś falę odbitą, padającą na przetwornik, uznać można w jego obrębie za falę płaską /przetwornik znajduje się w „polu dalekim” wiązki odbitej od wady/.

Obliczanie amplitudy echa w przypadku 1

Schemat obliczania pola akustycznego generowanego przez płaski przetwornik o powierzchni S przedstawia rys.5.



Rys.5. Schemat wyznaczania pola akustycznego wzbudzanego przetwornikiem o powierzchni S .

Z przetwornikiem związany jest układ współrzędnych x, y, z .
Ogólnie pole ciśnienia akustycznego powstającego w wyniku

tłokowych drgań powierzchni przetwornika w izotropowym, bezstratnym ośrodku wyrazić można jako

$$(1) \quad p = \frac{1}{2\pi} \int_S p_0 \frac{e^{-ikr}}{r} \left(ik - \frac{1}{r} \right) \cos \theta \, ds$$

gdzie: p - badane pole ciśnienia akustycznego
 p_0 - ciśnienie akustyczne na powierzchni przetwornika
 $r = |\vec{r}|$ - odległość
 S - powierzchnia przetwornika
 θ - kąt pomiędzy osią x a \vec{r}
 $k = 2\pi/\lambda$ - liczba falowa.

W przypadku generacji w ośrodku fali ciągłej / $p_0 = p_0 e^{i\omega t}$ gdzie $\omega = 2\pi f$, t - czas/, w zależności od kształtu przetwornika w ośrodku powstawać będą wiązki fal o różnych rozbieżnościach. W polu dalekim, dla przetwornika kołowego, kierunkowa charakterystyka osiowo symetrycznej wiązki opisana jest wyrażeniem

$$(2) \quad \frac{p}{p_0} \sim \frac{2J_1 \left(\frac{\omega}{c} \cdot \frac{D}{2} \cdot \sin \theta \right)}{\frac{\omega}{c} \cdot \frac{D}{2} \cdot \sin \theta}$$

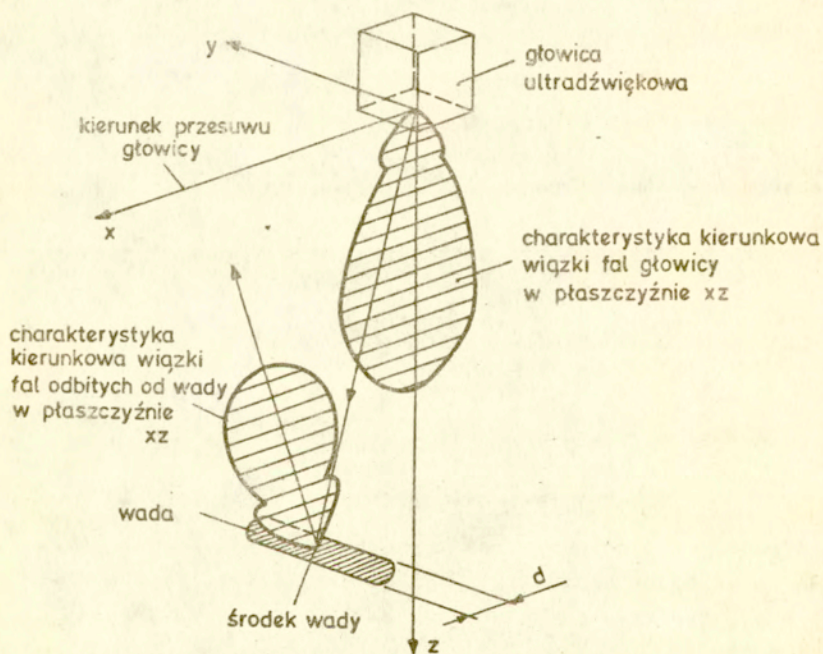
gdzie: J_1 - funkcja Bessela pierwszego rzędu
 D - średnica przetwornika
 θ - kąt pomiędzy osią wiązki a promieniem.

W przypadku zastosowania przetwornika prostokątnego o bokach D_1, D_2 powstająca wiązka fal posiada dwie płaszczyzny symetrii a jej charakterystyka kierunkowa opisana jest w polu dalekim wzorem

$$(3) \quad \frac{p}{p_0} \sim \frac{\sin \left(\frac{J_1 D_1}{\lambda} \cdot \sin \theta_1 \right) \cdot \sin \left(\frac{J_1 D_2}{\lambda} \cdot \sin \theta_2 \right)}{\left(\frac{J_1 D_1}{\lambda} \cdot \sin \theta_1 \right) \cdot \left(\frac{J_1 D_2}{\lambda} \cdot \sin \theta_2 \right)}$$

gdzie: θ_1, θ_2 - kąty pomiędzy promieniem a płaszczyznami normalnymi do powierzchni przetwornika i równoległymi odpowiednio do boku D_1 i boku D_2 .

W badaniach zależności amplitudy impulsu odbitego od wady od położenia głowicy /krzywa $H(A)$ / interesujące są rozkłady ciśnień akustycznych wiązek fal generowanych przez przetwornik i odbitej od wady w płaszczyźnie wyznaczonej przez kierunek przesuwu głowicy i oś wiązki fal głowicy. Płaszczyzna ta jest normalna do powierzchni materiału i leży na niej środek wady. Rozbieżności wiązek fal w tej płaszczyźnie zależą głównie od szerokości przetwornika i wady mierzonych w niej oraz od długości fali w ośrodku. Wzajemne położenie przetwornika, wady i charakterystyki wiązek fal pokazano na rys.6.

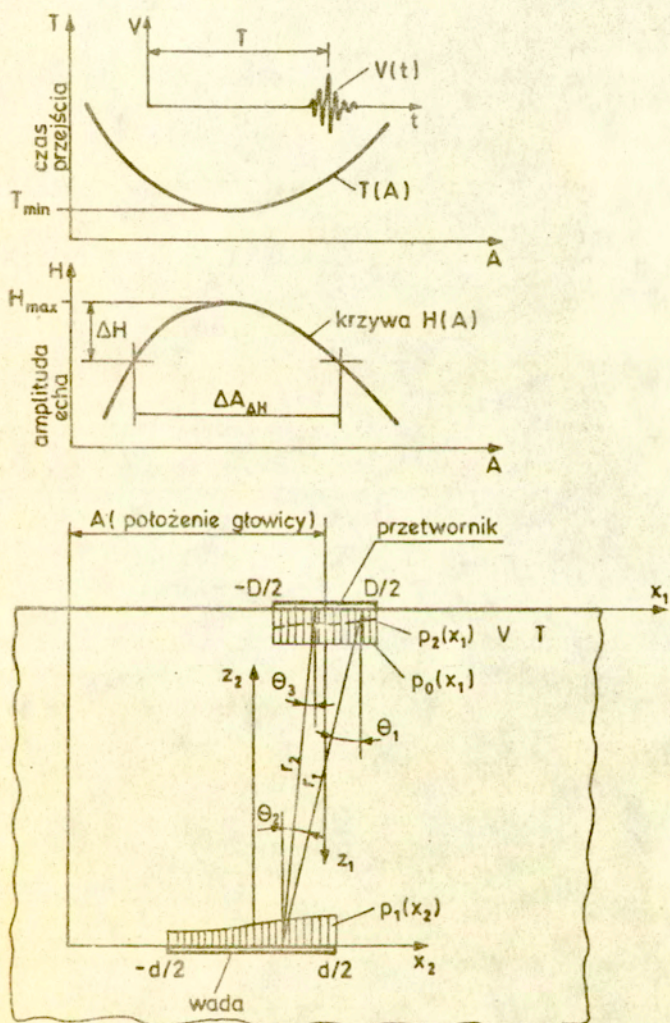


Rys.6. Wzajemne położenie głowicy, wady oraz charakterystyki kierunkowe wiązek fal generowanej przez przetwornik i odbitej od wady w płaszczyźnie badania.

Dlatego też, w dalszych rozważaniach i do obliczeń numerycznych przyjęto płaski model, w którym rzeczywisty przetwornik i wadę o skończonych wymiarach zastąpiono nieskończenie

długimi taśmami. Schemat obliczania krzywej $H(A)$ w płaskim modelu pokazano na rys.7.

Pole ciśnienia akustycznego przetwornika mającego postać nieskończenie długiej taśmy w kierunku prostopadłym do płas-



Rys.7. Schemat obliczania zależności amplitudy echa i czasu przejścia impulsu od położenia głowicy. Przypadek 1.

szczyzny rysunku, drgającej tłokowo, o szerokości D w izotropowym, bezstratnym ośrodku opisuje wyrażenie

$$(4) \quad p_1(x_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{-D/2}^{D/2} p_0(x_1) \frac{e^{-ikr}}{r_1} \cdot \left(ik - \frac{1}{r_1} \right) \cdot \cos \theta_1 dx_1$$

gdzie: $p_1(x_2)$ - badane pole ciśnienia akustycznego

$p_0(x_1)$ - pole na powierzchni membrany

$r_1 = |\vec{r}|$ - odległość

θ_1 - kąt pomiędzy \vec{r} i normalną do powierzchni membrany, pokazany na rys.7.

Dla odległości r_1 znacznie większych od długości fali λ przyjąć można przybliżenie

$$(5) \quad ik - \frac{1}{r_1} = \frac{i2\pi}{\lambda} - \frac{1}{r_1} \approx \frac{2\pi}{\lambda}$$

a ciśnienie akustyczne badanego pola w przybliżeniu strefy falowej [40] wyrazić jako

$$(6) \quad p_1(x_2) = \frac{1}{\lambda} \int_{-D/2}^{D/2} p_0(x_1) \frac{e^{-ikr_1}}{r_1} \cos \theta_1 dx_1$$

Ciśnienie na płaszczyźnie X_2 odpowiada ciśnieniu fali padającej na powierzchnię reflektora. Pole dyfrakcyjne reflektora nieskończenie długiego w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku, o szerokości d , w tym samym przybliżeniu wyrazić można jako

$$(7) \quad p_2(x_1) = \frac{1}{\lambda} \int_{-d/2}^{d/2} p_1(x_2, R) \frac{e^{-ikr_2}}{r_2} \cos \theta_2 dx_2$$

gdzie R - współczynnik odbicia fali na powierzchni reflektora.

Ciśnienie $p_2(x_1)$ odpowiada ciśnieniu fali docierającej do powierzchni przetwornika pełniącego teraz rolę odbiornika.

Wartość napięcia sygnału powstającego na okładkach przetwornika o szerokości D wynosi

$$(8) \quad V = K_1 \int_{-D/2}^{D/2} p_2(x_1) \cos \theta_3 dx_1$$

gdzie K_1 – stała.

Amplituda echa H jest proporcjonalna do maksymalnej wartości napięcia sygnału V_{max} w zakresie czasu trwania impulsu odbitego

$$(9) \quad H = K_2 \cdot V_{max}$$

gdzie K_2 – stała.

Czas T przejścia impulsu na drodze przetwornik-wada-przetwornik odpowiada czasowi pomiędzy momentem generacji impulsu w ośrodku /momentem pojawienia się na okładkach przetwornika pobudzającego impulsu elektrycznego/ a momentem, w którym na okładkach przetwornika działającego jako odbiornik i pobudzanego impulsem odbitym od wady powstaje maksymalne napięcie V_{max} . Moment ten odpowiada chwili, w której na powierzchni przetwornika średnie ciśnienie akustyczne impulsu odbitego osiąga wartość maksymalną

$$(10) \quad T = t(V_{max})$$

Krzywa $H(A)$ opisuje zależność amplitudy echa H od współrzędnej położenia środka przetwornika A . Długość przesuwu głośnicy przy spadku amplitudy echa o wartość ΔH od wartości maksymalnej wynosi więc

$$(11) \quad \Delta A = A_{H_1} - A_{H_2}$$

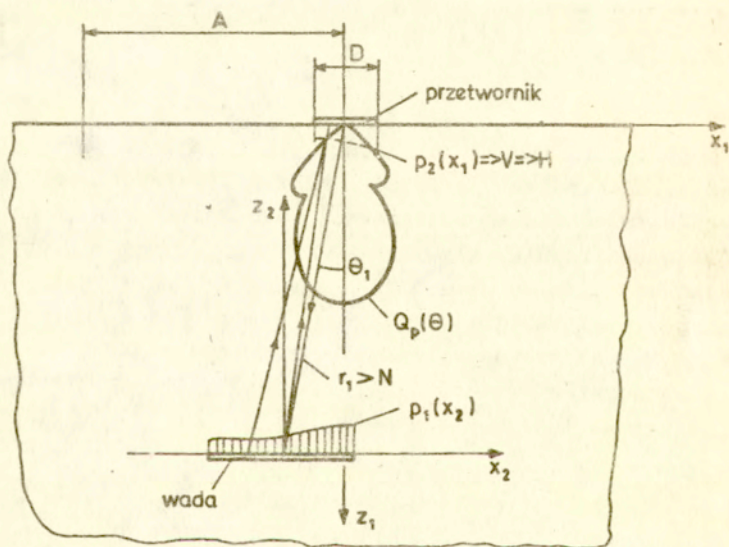
gdzie $H_1 = H_2 = H_{max} - \Delta H$

A_{H_1}, A_{H_2} – współrzędne położenia przetwornika.

Podobnie jak krzywą $H(A)$ obliczyć można zmiany czasu przejścia impulsu dla kolejnych położań przetwornika ponad reflektorem, co schematycznie pokazano w górnej części rysunku 7.

Obliczanie amplitudy echa w przypadku 2

Zgodnie z podanymi uprzednio określeniami obejmuje on sytuacje, gdy wada znajduje się w większej niż w Przypadku 1 odległości od przetwornika. Schemat obliczania amplitudy echa przy przyjęciu płaskiego modelu w takim przypadku pokazano na rys.8.



Rys.8. Schemat obliczania obwiedni echa wady. Przypadek 2.

Wada, z którą związany jest układ współrzędnych x_2, z_2 znajduje się w strefie Fraunhofera pola akustycznego przetwornika. Rozkład ciśnienia akustycznego tego pola w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki opisać można w przybliżeniu Fraunhofera [95]. W przybliżeniu tym, charakterystykę kierunkowości nieskończenie długiej, prostopadłej do rysunku membrany o szerokości D , drgającej tłokowo, opisuje wyrażenie

$$(12) \quad Q_p(\theta_1) = K_3 \frac{\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} \cdot \sin\theta_1\right)}{\frac{\pi D}{\lambda} \cdot \sin\theta_1}$$

gdzie K_3 — stała
a ciśnienie akustyczne pola takiej membrany

$$(13) \quad p_1(x_2) = \frac{K_4}{r_1} Q_p(\theta_1)$$

gdzie K_4 — stała.

To samo wyrażenie $Q_p(\theta_1)$ opisuje charakterystykę pola membrany prostokątnej o boku D równoległym do osi x_1 i skończonej długości.

Jeśli przetwornik prostokątny o szerokości D i długości L posiada wymiary zbliżone do kwadratu $D/L < 0,95$, to ciśnienie akustyczne pola generowanego przez taki przetwornik wyrazić można w przybliżeniu [102] jako

$$(14) \quad p_1(x_2) = K_5 \cdot \sin \frac{\pi \cdot N}{2 \cdot r_1} \cdot Q_p(\theta_1)$$

gdzie N — długość pola bliskiego przetwornika
 K_5 — stała.

Znając ciśnienie akustyczne $p_1(x_2)$ na powierzchni reflektora, postępując jak w Przypadku 1, obliczyć można krzywą $H(A)$ i zmiany czasu przejścia impulsu.

Obliczanie amplitudy echa w przypadku 3

Najprostszy sposób obliczania amplitudy echa przyjęć można gdy szerokość przetwornika D i wady d są małe w stosunku do odległości pomiędzy nimi. Założyć można wtedy, że fala padająca na wadę i odbita od niej fala padająca na przetwornik są w ich obrębie falami płaskimi a ciśnienia fal na powierzchni wady i przetwornika są stałe.

Amplituda echa wyrażona może być wtedy wzorem

$$(15) \quad H = K_6 \cdot Q_p^2(\theta_1) \cdot P_p(r) \cdot Q_r(\theta_2) \cdot P_r(r) \cdot R$$

gdzie $Q_p(\theta_1)$ - nadawcza i odbiorcza charakterystyka kierunkowości przetwornika

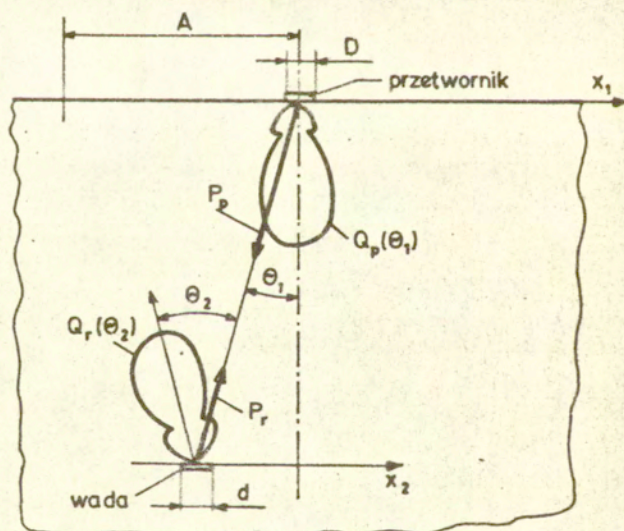
$Q_r(\theta_2)$ - charakterystyka kierunkowości pola wady

$P_p(r), P_r(r)$ - funkcje opisujące zmiany ciśnienia akustycznego wzdłuż osi wiązek generowanej przez przetwornik i odbitej od wady, wywołane ich rozbieżnościami

R - współczynnik odbicia fal na powierzchni wady

K_6 - stała.

Schemat obliczania amplitudy echa przy takich przybliżeniach przedstawia rys.9.



Rys.9. Schemat obliczania amplitudy echa wady. Przypadek 3.

4.2. Numeryczne modelowanie zależności amplitudy echa od położenia głowicy

Celem tej części pracy jest uzyskanie prostego modelu obliczeniowego umożliwiającego badania zależności amplitudy impulsu fal podłużnych odbitych od wady, od wzajemnego położenia przetwornika nadawczo-odbiorczego i wady w jednorodnym, izotropowym ośrodku tłumiącym.

Przedstawiony w rozdziale 3 zakres odległości pomiędzy przetwornikiem a wadą oraz zakres wielkości wad, przy przyjęciu, że wada znajduje się w polu dalekim wiązki fal przetwornika, pozwalają na wykorzystanie uproszczonego opisu pola akustycznego generowanego w ośrodku przez przetwornik. Wykorzystano sposób obliczania amplitudy echa jak w Przykładu 2 opisanym w rozdziale 4.1.

Przyjęcie takiego schematu upraszcza obliczenia a w razie potrzeby pozwala również na łatwe dopasowanie wykorzystywanej w obliczeniach charakterystyki kierunkowości przetwornika do rzeczywistych charakterystyk głowic ultradźwiękowych stosowanych w badaniach nieniszczących i w części doświadczalnej pracy.

Przyjęty płaski model, oparty o zasady akustyki geometrycznej i superpozycję impulsów, zbudowany jest z następujących elementów:

- badany materiał — jednorodny ośrodek izotropowy, którego własności opisują prędkości propagacji fal podłużnych c_L , poprzecznych c_T oraz współczynniki tłumienia tych fal α ,
- przetwornik /działający jako nadajnik/ — generujący w ośrodku impuls fal ultradźwiękowych o częstotliwości f , czasie narastania T_n i opadania T_0 , rozkład ciśnienia akustycznego w wiązce opisują charakterystyka kierunkowości Q_p i funkcja spadku ciśnienia wzdłuż osi wiązki P_p ,
- wada — płaski reflektor podzielony na m elementów /nieskończenie długich taśm/ o szerokości d_E każdy, działających jak reflektory elementarne,
- przetwornik /działający jako odbiornik/ — podzielony na n

elementów o szerokości D_E każdy, czułych na składowe drgań normalne do powierzchni [96].

Obliczenie amplitudy echa i dalej krzywej $H(A)$ oraz zmian czasu przejścia impulsu sprowadza się do wyznaczenia dla każdego z promieni łączących środki przetwornika /nadajnika/ z elementami reflektora i elementy reflektora z elementami przetwornika /odbiornika/, czasu przejścia impulsu, jego fazy oraz ciśnienia akustycznego.

Rachunki obejmują kolejno obliczenia ciśnienia akustycznego fali padającej na element wady, obliczenia ciśnienia fali odbitej od elementu wady i padającej na element przetwornika, czasu przejścia impulsu na drodze przetwornik-element wady-element przetwornika oraz faz impulsów docierających do elementów przetwornika.

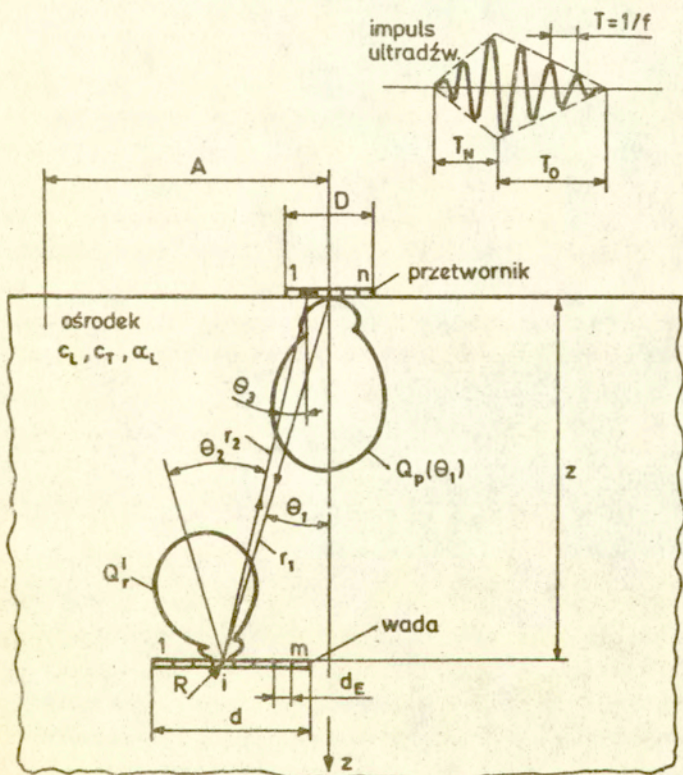
Dalej, impulsy elementarne docierające do przetwornika w różnych chwilach, z różnych kierunków i o różnych ciśnieniach akustycznych są sumowane a w wyniku uzyskany jest impuls fal odbitych od wady /echo wady/.

W przypadku gdy wszystkie elementy wady stają się źródłami docierających do przetwornika fal odbitych, łączna ilość impulsów elementarnych, które w sumie tworzą echo jest równa iloczynowi ilości elementów wady i ilości elementów przetwornika odbiorczego.

Poniżej przedstawiony jest tok postępowania i wyrażenia wykorzystane w numerycznym modelowaniu zależności amplitudy echa od położenia głowicy. Każdy z elementów wady, w zależności od położenia głowicy i charakterystyki kierunkowości generowanej przez nią wiązki, pobudzany jest impulsami o różnym ciśnieniu akustycznym i w różnym czasie. Element taki staje się źródłem fali odbitej, której charakterystyka kierunkowości zależy od jego szerokości, kierunku fali padającej i częstotliwości fali.

Ciśnienie akustyczne impulsu odbitego zależne jest od ciśnienia impulsu padającego i ciśnieniowego współczynnika odbicia fali na powierzchni elementu wady. Dzięki małym rozmiarom elementów wady przyjąć można, że fala padająca na każdy element wady jest w jego obszarze falą płaską

a kierunek jej propagacji jest równoległy do linii łączącej środek przetwornika głowicy ze środkiem elementu wady. Tak więc ciśnienie akustyczne impulsu odbitego od każdego z elementów wady obliczane jest tak jak amplituda echa wady obliczana zgodnie z Przypadkiem 3 opisanym w rozdziale 4.1. Schemat obliczania amplitudy echa według przyjętego modelu numerycznego pokazano na rys.10.



Rys.10. Schemat obliczania amplitudy echa wady leżącej w ośrodku nieograniczonym.

Ciśnienie akustyczne fali padającej na jeden z elementów wady wynosi

$$(16) \quad P_1 = Q_p(\theta_1) \cdot P_p(r_1) \cdot e^{-\alpha_L r_1}$$

gdzie $Q_p(\theta_1)$ - jest funkcją wielkości przetwornika i długości fali w badanym ośrodku, zgodnie z (9)

$P_p(r_1)$ - funkcja opisująca spadek ciśnienia w wiązce fal przetwornika wywołany rozbieżnością wiązki

$e^{-\alpha_L r_1}$ - człon opisujący wpływ tłumienia.

Przy badaniu krzywej $H(A)$ nie istotna jest bezwzględna wartość amplitudy echa a jedynie jej zmiany obserwowane podczas ruchu przetwornika /mierzona jest długość przesuwu głowicy przy tak zwanym względnym progu odniesienia/. Ze względu na silną kierunkowość wiązek generowanych przez głowice, odległości pomiędzy przetwornikiem a wadą zmieniają się przy interesujących w badaniach spadkach amplitudy echa nieznacznie. Przyjmąc więc można, że niezależnie od kształtu przetwornika /kwadratowy, okrągły, prostokątny/ ciśnienie akustyczne $P_p(r_1)$ zmienia się z odległością jak dla przetwornika okrągłego o średnicy skutecznej D .

$$(17) \quad P_p(r_1) = \sin \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{D^2}{4} + r_1^2} - r_1 \right\}$$

Takie wyrażenie zmian ciśnienia wzdłuż osi wiązki fal, wywołanych rozbieżnością wiązki, pozwala na zachowanie w przybliżeniu proporcji obliczanych amplitud ech wad jak dla przetworników i reflektorów o skończonych długościach. Nie wpływa to praktycznie na przebieg obliczanej według płaskiego modelu krzywej $H(A)$.

Wartość napięcia sygnału elektrycznego powstającego na okładkach jednego z elementów przetwornika przy odbiorze fali odbitej od jednego z elementów wady wynosi

$$(18) \quad V_E = P_1 \cdot Q_r(\theta_2) \cdot P_r(r_2) \cdot R(\theta_1) \cdot \cos \theta_3 \cdot e^{-\alpha_L r_2}$$

gdzie $Q_r(\theta_2)$ - charakterystyka kierunkowości wiązki fal odbitych od elementu wady opisana wzorem

$$Q_r(\theta_2) = \cos \theta_1 \cdot \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_E \cdot \sin \theta_2\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} d_E \cdot \sin \theta_2}$$

$R(\theta_1)$ - ciśnieniowy współczynnik odbicia fali podłużnej na powierzchni elementu wady.

Założono, że powierzchnia wady jest powierzchnią swobodną ciała stałego a współczynnik odbicia fali podłużnej na takiej powierzchni wyrażony jest zależnością [103]

$$(19) \quad R(\theta) = \frac{\left(\frac{c_T}{c_L}\right)^2 \cdot \sin(2\theta) \cdot \sin(2\theta_T) - \cos^2(2\theta_T)}{\left(\frac{c_T}{c_L}\right)^2 \cdot \sin(2\theta) \cdot \sin(2\theta_T) + \cos^2(2\theta_T)}$$

gdzie $\theta_T = \arcsin(c_T/c_L \cdot \sin \theta)$

Wzór ten nie uwzględnia wpływu tłumienia fali podłużnej w ośrodku, jednakże dla granicy swobodnej w stali wpływ tłumienia nie ma praktycznie znaczenia na wartość współczynnika odbicia.

Przyjęto, że zmiana ciśnienia akustycznego fali odbitej od elementu wady, podobnie jak dla fali generowanej przez przetwornik wynosi

$$(20) \quad P_r(r_2) = \sin \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{d_E^2}{4} + r_2^2} - r_2 \right\}$$

Do każdego z elementów przetwornika docierają impulsy ze wszystkich, mieszczących się w obrębie wiązki generowanej przez przetwornik, elementów wady. Tak więc całkowita wartość napięcia na jednym elemencie przetwornika wynosi

$$(21) \quad V_{CE} = \sum_n V_E$$

gdzie n - ilość aktywnych elementów wady

Odebrany na przetworniku całkowity sygnał elektryczny ma

napięcie będące sumą napięć sygnałów poszczególnych elementów przetwornika

$$(22) \quad V = \sum_m V_{CE}$$

gdzie m - ilość elementów przetwornika.

Czas przejścia impulsu elementarnego na drodze przetwornik-element reflektora-element przetwornika wynosi

$$(23) \quad T_E = (r_1 + r_2) / c_L$$

Amplituda echa jest proporcjonalna do maksymalnej wartości napięcia sygnału elektrycznego w zakresie czasów od T_{Emin} do T_{Emax}

$$(24) \quad H = V_{max}(t) \quad T_{Emax}^0 > t > T_{Emin}$$

gdzie T_{Emax}^0 - maksymalny czas przejścia impulsu elementarnego powiększony o czas trwania impulsu

$$T_{Emax}^0 = T_{Emax} + T_n + T_0$$

Amplitudę echa wady obliczoną według przedstawionego modelu wyrazić więc można jako

$$(25) \quad H = \sum_m \sum_n \left\{ Q_p \cdot P_p \cdot Q_r \cdot P_r \cdot R \cdot \cos \theta_3 \cdot e^{-\alpha(r_1 + r_2)} \right\}$$

a mierzony czas przejścia impulsu, czyli czas pomiędzy momentem generacji impulsu a odbiorem maksimum amplitudy echa, wynosi

$$(26) \quad T = t_{V_{max}}$$

Amplituda echa dla kolejnych położeń przetwornika określonych współrzędną \hat{A} formuje krzywą $H(\hat{A})$.

W modelu założono, że kształt impulsu generowanego przez głowicę, określony przez czas narastania T_n , czas opadania T_o i częstotliwość wypełnienia f jest stały. Nie ulega on zmianom w czasie propagacji impulsu w ośrodku wywołanym różnym tłumieniem składowych o różnych częstotliwościach ani nie zależy od kąta θ /to znaczy założono jedną-kową, stałą charakterystykę kierunkowości dla wszystkich składowych częstotliwości impulsu/.

Zmiany czasu trwania impulsu odebranego przez przetwornik wywołane są jedynie sumowaniem impulsów elementarnych docierających do przetwornika w różnych momentach i pod różnymi kątami [97].

W przypadku usytuowania wady w pobliżu bocznej ściany badanego przedmiotu, do przetwornika docierać mogą również impulsy odbite od nieograniczonego, płaskiego reflektora jakim jest boczna ściana. Dla wybranej pary elementów wady i przetwornika impulsy elementarne propagują się torami przetwornik-wada-przetwornik oraz przetwornik-wada-boczna ściana-przetwornik lub też ich kombinacjami.

Impuls docierający do wybranego elementu przetwornika i pochodzący od jednego elementu wady będzie więc w tym przypadku sumą impulsów rozchodzących się następującymi drogami:

- a/ $r_1 - r_2$
- b/ $r_1 - r_3$
- c/ $r_3 - r_4$
- d/ $r_3 - r_4$

co schematycznie pokazano na rys.11. /w ośrodku nieograniczonym możliwe były tylko drogi $r_1 - r_2$ /.

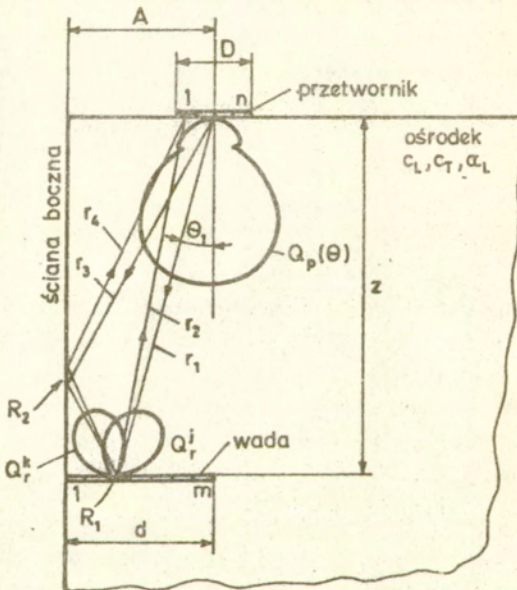
Przy odbiciu fali od powierzchni bocznej ściany, ciśnienie akustyczne impulsu zmienia się zgodnie z ciśnieniowym współczynnikiem odbicia R_2 wyrażonym wzorem (19).

Obliczona amplituda echa tak usytuowanej wady jest więc sumą ciśnień impulsów elementarnych docierających do przetwornika czterema różnymi drogami i wyrażona może być

jako

$$(27) \quad H = \sum_k \sum_m \sum_n \left\{ Q_p \cdot P_p \cdot R_1 \cdot Q_r \cdot P_r \cdot R_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot e^{-\alpha(r_p + r_r)} \right\}$$

Położenie przetwornika /współrzędna A / mierzone jest w tym przypadku od bocznej powierzchni badanego materiału a minimalna wartość A wynosi $A_{\min} = D/2$ /czyli połowę szerokości przetwornika/.



Rys.11. Schemat obliczania amplitudy echa dla wady rozpoczynającej się od bocznej ściany badanego przedmiotu.

Stosowane w badaniach ultradźwiękowych głowice generują silnie ukierunkowane wiązki fal a długość przesuwu głowicy silnie zależy od charakterystyki kierunkowości pola przetwornika /w opisanym w rozdziale 4.1 Przypadku 3, obliczana amplituda echa proporcjonalna jest do kwadratu wartości tej charakterystyki/. Fakt ten oraz stosowanie w pomiarach

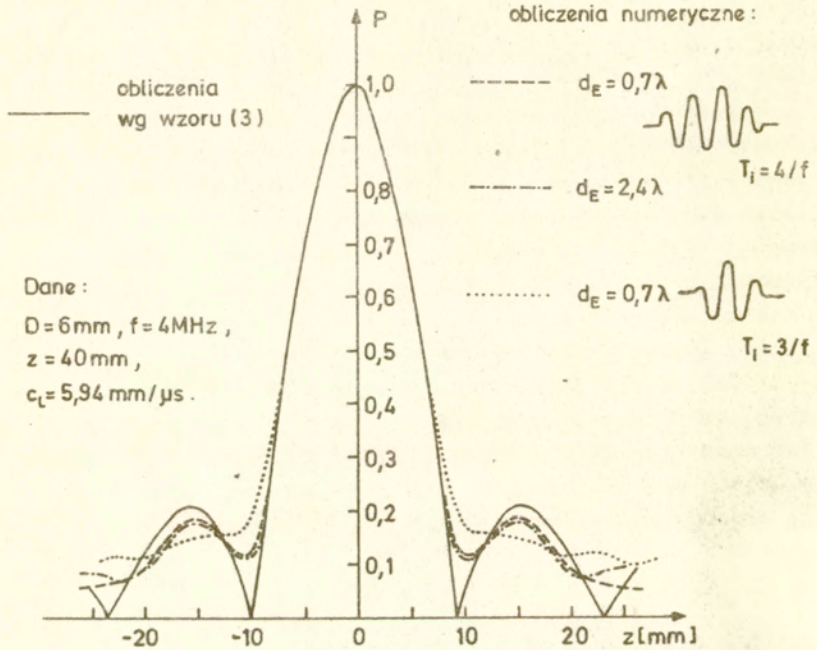
spadków amplitudy echa o maksimum 20dB od wartości maksymalnej, pozwala na uwzględnienie w obliczeniach jedynie listka głównego charakterystyki kierunkowości przetwornika i pominięcie słabych impulsów elementarnych w obszarach listków bocznych. Listki te pokazano schematycznie na charakterystykach głowic na rys.8 i 9.

W przedstawionych na rys.10 i 11 schematach obliczeń elementy wad leżą na jednej linii równoległej do kierunku przesuwu przetwornika /tworzą tzw. idealne wady płaskie/. Możliwe jest wprowadzenie przesunięć ΔZ poszczególnych elementów w kierunku osi Z i modelowanie w ten sposób chropowatości powierzchni reflektora. Rozkład przesunięć ΔZ wzdłuż reflektora może być zadany lub może być funkcją zmiennej losowej. Możliwe jest również modelowanie odbicia wiązki fal od reflektorów nachylonych lub od reflektorów o dowolnym przekroju wyznaczonym linią łamaną utworzoną z łańcucha elementów o szerokości d_g . Niektóre z elementów o dowolnej szerokości, mogą być „nieaktywne” i modelować mogą przerwy w powierzchni wady.

4.2.1 Badania modelu numerycznego

Prawidłowości obliczeń uzyskanych przy wykorzystaniu opisanego wyżej modelu numerycznego zweryfikowano porównując rozkłady ciśnienia akustycznego w przekroju wiązki obliczone w przybliżeniu Fraunhofera, zgodnie ze wzorem (3), oraz obliczone zgodnie z przyjętym modelem przetwornika /lub wady/ podzielonego na szereg wąskich elementów. Na rys.12 przedstawiono obliczone rozkłady ciśnienia akustycznego w przekroju wiązki generowanej przez tłokowo drgający przetwornik o szerokości 6 mm, w stali / $c_L = 5,92 \text{ mm}/\mu\text{s}$, $\lambda = 1,48 \text{ mm}$ /, w odległości $Z = 40 \text{ mm}$ od powierzchni przetwornika. Linia ciągła przedstawia wyniki uzyskane według wzoru (3) a linie przerywane i kropkowe — wyniki obliczeń numerycznych dla różnych czasów trwania impulsu ultradźwiękowego

i różnych wielkości elementów, na które podzielono przetwor-
nik.



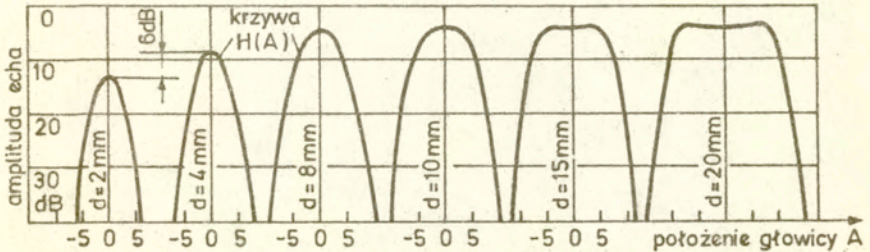
Rys.12. Obliczone rozkłady ciśnienia akustycznego w przekroju wiązki dla różnych parametrów obliczeń.

Widoczna jest zgodność wyników w obszarze listka głównego wiązki i odchylenia dla krótkiego czasu trwania impulsu przy spadkach ciśnienia większych niż 50%. Przedstawioną zgodność wyników dla dłuższego czasu trwania impulsu uzyskano dla szerokości elementów przetwornika d_E° w zakresie od 0,5 do 1,6 długości fali w ośrodku.

Na rys.13 pokazano przykładowy zbiór obliczonych numerycznie krzywych $H(A)$ płaskich wad o szerokości od 2 do 20 mm leżących w odległości 40 mm od przetwornika, w ośrodku o parametrach $c_L = 5,94$ i $c_T = 3,23\text{ mm}/\mu\text{s}$ /stal/, wykrywanych głowicą z przetwornikiem $D = 10\text{ mm}$ i $f = 4\text{ MHz}$, generującym

impuls o czasie narastania $T_n = 0,3125$ i opadania $T_o = 0,5625 \mu s$.

Przetwornik : $D = 10 \text{ mm}$, $f = 4 \text{ MHz}$ Ośrodek : $c_L = 5,92$; $c_T = 3,23$; $\alpha = 0$
 Reflektory : $d = 2 \div 20 \text{ mm}$, $d_E = 1 \text{ mm}$, $z = 40 \text{ mm}$

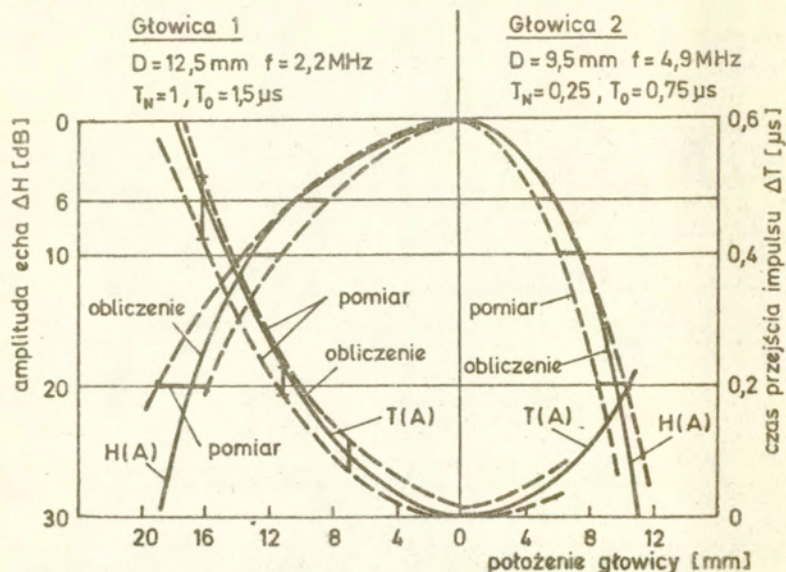


Rys.13. Zbiór obliczonych krzywych $H(A)$ dla wad o różnych wielkościach, leżących w tej samej odległości od przetwornika.

Na rysunku widoczne są zmiany amplitudy echa, która wzrasta z powiększaniem szerokości wady oraz zmiany kształtu krzywych $H(A)$. Dla większych wad $d \geq 15 \text{ mm}$ w krzywych pojawia się plateau i obserwowane doświadczalnie lokalne maksima amplitudy echa na brzegach plateau.

Przykładowy zestaw wyników obliczeń numerycznych, które wykorzystywane były do analizy zależności długości przesuwu głowicy od parametrów głowicy, ośrodka i wady przedstawiono na rys.14. Pokazuje on krzywe $H(A)$ oraz zmiany czasu przejścia impulsu $T(A)$. Na rysunku pokazano połowy symetrycznych krzywych obliczone dla dwóch głowic różniących się wielkościami przetworników i częstotliwościami. W obydwu przypadkach reflektorem fal jest wada o szerokości 2 mm, leżąca w odległości 85 mm od powierzchni przesuwu głowicy, w stali. Wyniki obliczeń krzywych $H(A)$ i $T(A)$ przedstawione są na rys.14 liniami ciągłymi. Dla porównania liniami przerywanymi zaznaczono na nim wyniki doświadczalnych pomiarów krzywych $H(A)$ i $T(A)$ i ich rozrzuty. Pomiary doświadczalne przeprowadzono na próbce stalowej zgodnie z opisem podanym dalej

w rozdziale 4.3.



Rys.14. Zestaw wyników obliczeń krzywych $H(A)$ i zmian czasu przejścia impulsu $T(A)$ dla reflektora $d=2$ mm, badanego różnymi głowicami.

Schemat logiczny i opis działania programu obliczającego zależności amplitudy echa i czasu przejścia impulsu od położenia głowicy normalnej, zamieszczono w załączniku 1.

4.3 Badania doświadczalne

Badania doświadczalne, których celem była weryfikacja wyników obliczeń, wykonano na próbkach stalowych oraz w wodzie. Reflektorami w próbkach stalowych były płaskie nacięcia /wady sztuczne/ a w badaniach zanurzeniowych – płaskie reflektory metalowe, opisane dalej. Badania krzywych $H(A)$ dla wad rozpoczynających się od bocznej powierzchni materiału przeprowadzono tylko na próbkach stalowych, gdzie

boczna ściana próbki była powierzchnią swobodną.

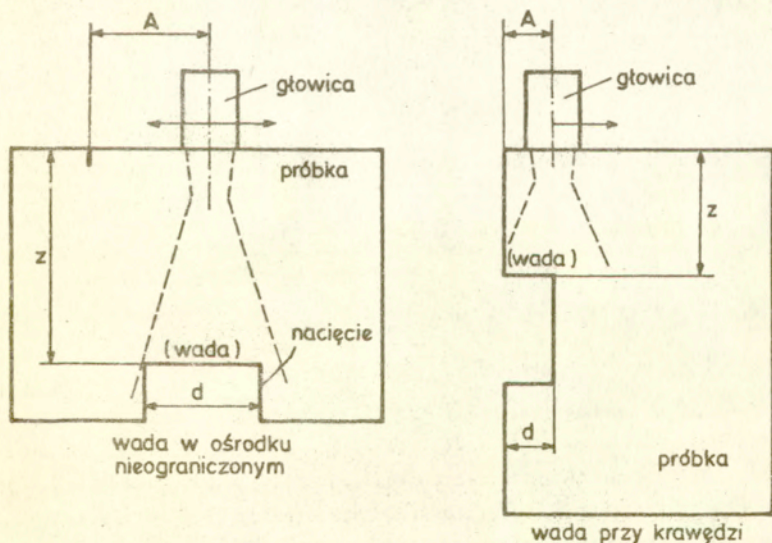
W pomiarach stosowano przetworniki piezoelektryczne o szerokościach od 6 do 13 mm i częstotliwościach rezonansowych od 1 do 10 MHz. Przetworniki działały jako przetworniki nadawczo-odbiorcze a do generacji i odbioru echa wady wykorzystano defektoskop ultradźwiękowy.

Dokładne pomiary zmian czasu przejścia wykonano nanosekundowym miernikiem czasu przejścia impulsu.

W badaniach przeprowadzonych na próbkach stalowych przetworniki przesuwane były po ich powierzchniach ręcznie. W badaniach zanurzeniowych przemieszczany był metalowy reflektor względem nieruchomego przetwornika.

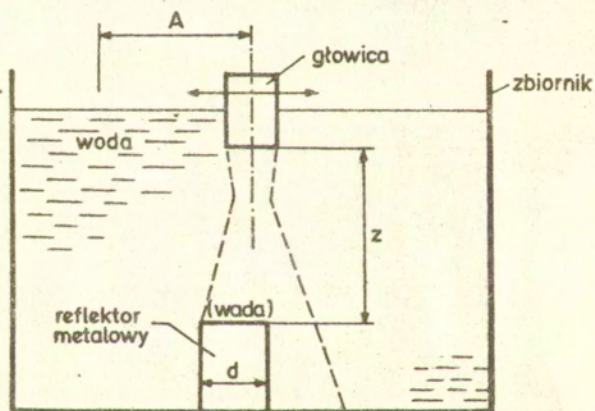
Jako ośrodek sprzęgającego w badaniach kontaktowych używano oleju maszynowego.

Schemat badań na próbkach stalowych pokazano na rys.15 a badań zanurzeniowych na rys.16.



Rys.15. Schemat badań wykonywanych na próbkach stalowych.

Badania wykonywane na próbkach stalowych odzwierciedlają rzeczywiste warunki propagacji fal i ich oddziaływania z powierzchniami spotykane w defektoskopii ultradźwiękowej. Wymagają one jednak wykorzystania znacznej ilości próbek o różnych wymiarach. Badania prowadzone zanurzeniowo umożliwiają łatwe zmiany położenia i wielkości reflektora oraz pozwalają, poprzez dobór odpowiednio dużego naczynia, na odizolowanie się od wpływu powierzchni ograniczających czy też utworzonych przez nie naroży, na amplitudę impulsu odbitego od wady.



Rys.16. Schemat badań zanurzeniowych.

4.4 Wyniki badania zależności amplituda-położenie głowicy dla wad w ośrodku nieograniczonym

4.4.1 Długości przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o 6dB

Uzyskane wyniki obliczeń i pomiarów zależności długości przesuwu głowicy od parametrów głowicy, ośrodka i wady przedstawiono na wykresach unormowanych. wprowadzono bezwymiarową długość przesuwu głowicy $\Delta A_6/D$ i bezwymiarową wielkość wady d/D . Bezwymiarowa odległość pomiędzy przetwornikiem a wadą wyrażona jest jako stosunek odległości z do wartości N wyrażonej jako

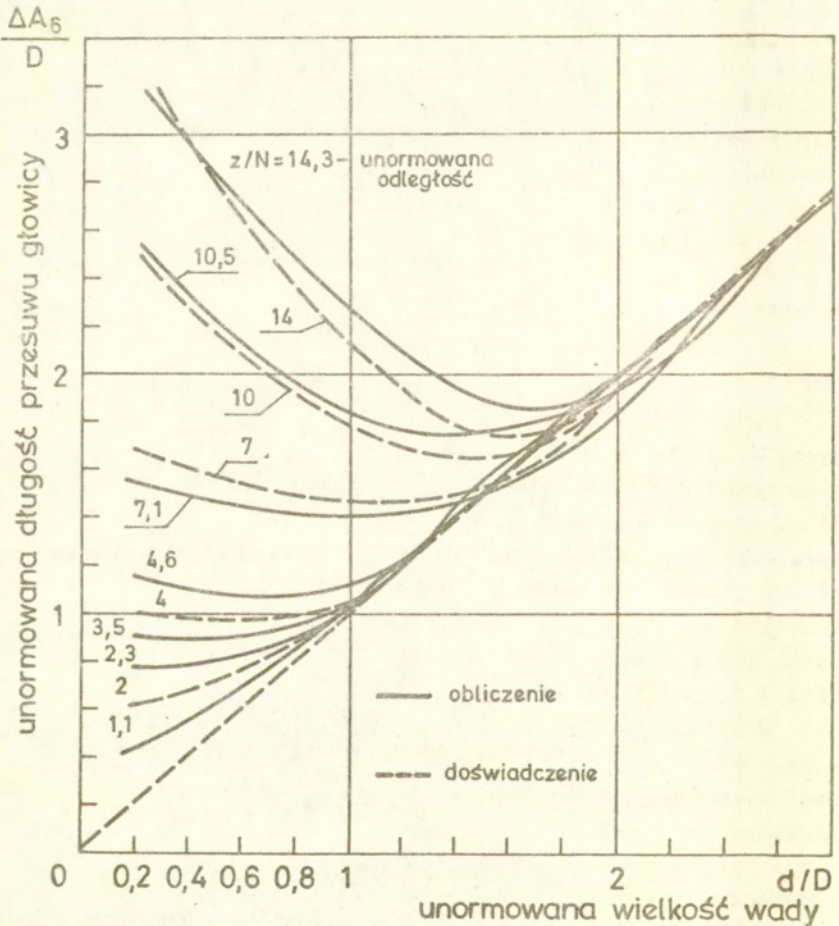
$$(28) \quad N = D^2 / (4 \cdot \lambda)$$

Wartość wyrażenia N przyjmowana jest często jako długość pola bliskiego głowicy z okrągłym przetwornikiem o średnicy D . W przypadku przetworników prostokątnych lub kwadratowych wyrażenie to nie określa długości pola bliskiego ani odległości pomiędzy przetwornikiem a ostatnim maksimum ciśnienia akustycznego na osi wiązki fal a jest wskaźnikiem kierunkowości wiązki fal w płaszczyźnie równoległej do boku przetwornika o długości D .

Dla przetwornika prostokątnego o bokach D_1 i D_2 , w zależności od tego czy kierunek przemieszczenia głowicy jest równoległy do boku D_1 czy D_2 , unormowana odległość pomiędzy przetwornikiem a tą samą wadą będzie więc różna. Różne też są charakterystyki kierunkowości wiązki fal takiego przetwornika w płaszczyznach równoległych do jego boków.

Na rys.17 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych unormowanych długości przesuwu głowicy $\Delta A_6/D$ przy spadku amplitudy echa o 6dB od unormowanej szerokości wady d/D . Parametrem krzywych na wykresie jest unormowana odległość z/N . Wyniki obliczeń naniesione są liniami ciągłymi a dla porównania, liniami przerywanymi zaznaczono wyniki pomiarów. Minima krzywych odpowiadają tym większym reflektorom d im

większa jest odległość pomiędzy przetwornikiem a wadą. Dla reflektorów większych widoczna jest równość długości przesuwu głowicy ΔA_6 i wielkości reflektora d .



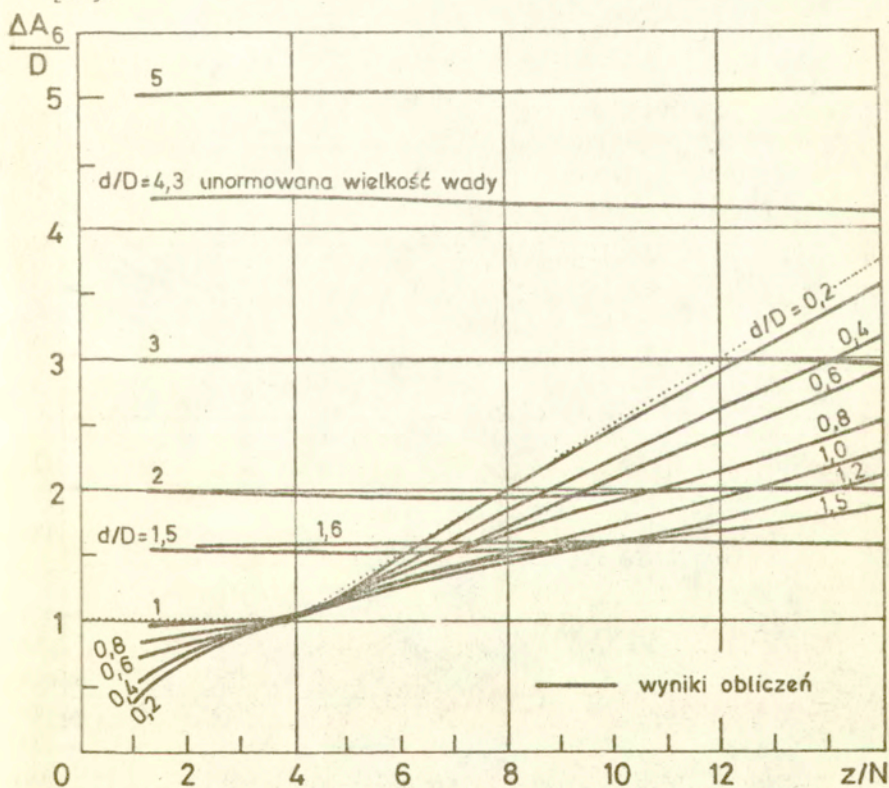
Rys.17. Unormowane zależności obliczonych i zmierzonych długości przesuwu głowicy od wielkości reflektora.

Dla reflektorów „małych”, o szerokości nie przekraczającej boku przetwornika i leżących w odległościach mniejszych od czterech N , długości przesuwu głowicy dla tych wad nie przekraczają wymiaru przetwornika. Jest to zgodne z wnios-

kami z pracy [28]. Lokalne odchylenia krzywych od linii $\Delta A_6 = d$ zaznaczonej na rysunku, dla wad o wielkościach $d/D = 1,5 + 2,5$ są zgodne z wynikami pomiarów.

Na rys.18 przedstawiono wyniki obliczeń unormowanych zależności $\Delta A_6(d, z)$ w innym układzie współrzędnych, w którym na osi poziomej odłożono unormowaną odległość z/N a parametrem krzywych jest unormowana szerokość reflektora d/D .

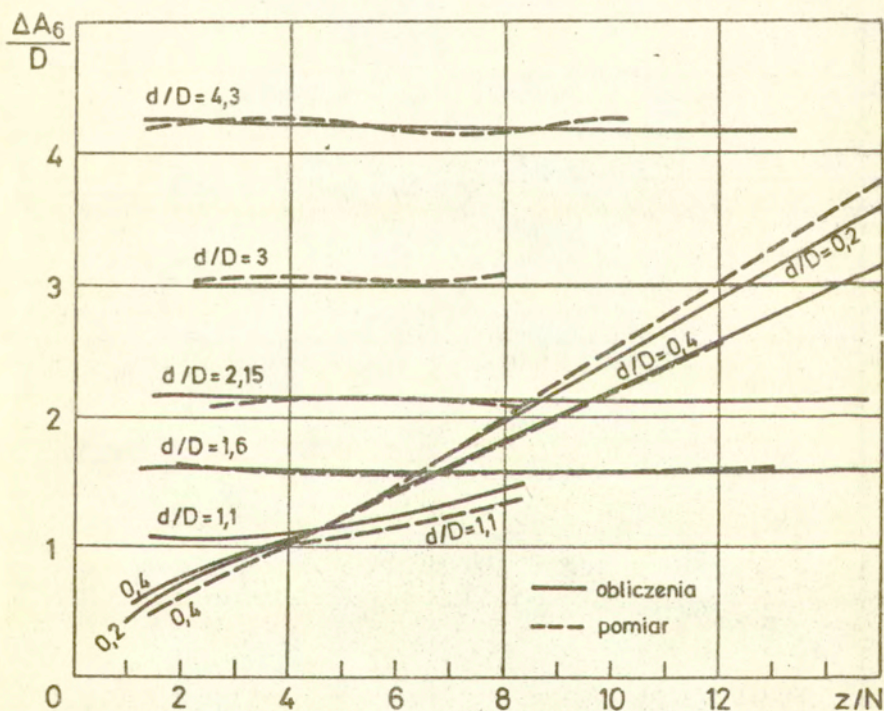
Naniesiona na wykresie linia kropkowa w zakresie odległości $z = 0 + 4N$ odpowiada wspomnianemu powyżej ograniczeniu z pracy [28] a w zakresie odległości $z > 4N$ ograniczeniu na minimalną, mierzalną długość przesuwu głowicy, przyjętemu w pracy [90].



Rys.18. Unormowane zależności długości przesuwu głowicy od odległości pomiędzy przetwornikiem a głowicą dla różnych wielkości wady /wyniki obliczeń/.

Zauważyć można, że w przyjętym zakresie odległości $z \leq 15N$ / dla płaskich reflektorów o szerokości $d=1,6D$, długość przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o 6dB jest praktycznie stała i równa szerokości wady. Odchylenia obliczonych długości przesuwów dla takich reflektorów nie przekraczają 5%.

Na rys.19 pokazano porównanie obliczonych numerycznie /linie ciągłe/ i zmierzonych eksperymentalnie /linie przerywane/ zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości wady. Podobnie jak na rys.18 zauważyć można brak zależności długości przesuwu głowicy od odległości dla reflektorów większych od 1,6 długości boku przetwornika. Odchyle-

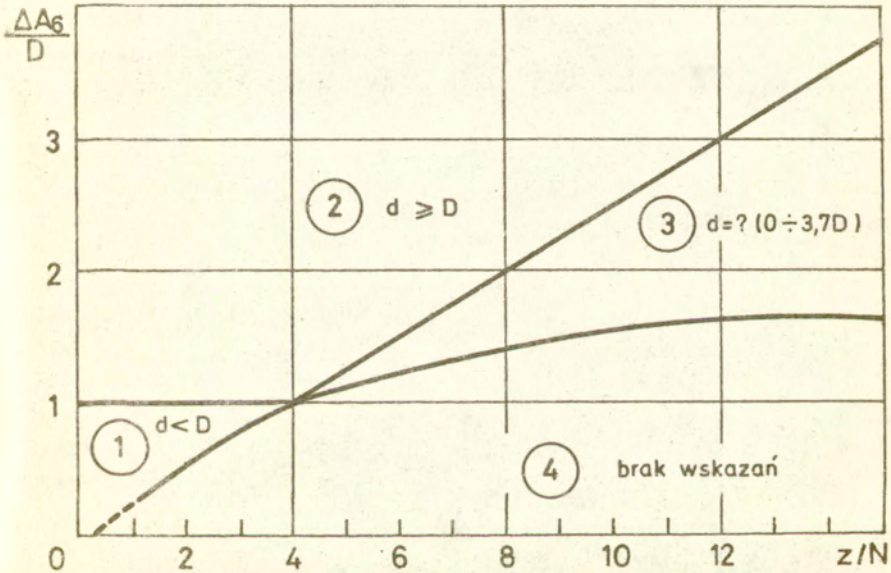


Rys.19. Unormowane zależności długości przesuwu głowicy od odległości pomiędzy przetwornikiem a głowicą dla różnych wielkości wady.

nia mierzonych długości przesuwów dla takich wad mieszczą się w granicach błędów pomiarowych.

Wartość $d=1,6D$ przyjęta więc może być jako graniczna wielkość reflektora, dla którego długość przesuwu głowicy, w granicach odległości $z=0+45N$ jest stała, niezależna od odległości.

Pole wykresu pokazanego na rys.18 i 19 podzielić można na cztery charakterystyczne obszary przedstawione na rys.20.



Rys.20. Charakterystyczne obszary zależności $\Delta A_6(d,z)$.

W obszarze ① leżą wyniki uzyskane dla reflektorów $d < D$ a odpowiadające im długości przesuwu głowicy spełniają warunek $\Delta A_6/D < 1$.

W obszarze ② mieszczą się wyniki dla reflektorów $d \geq D$, dla których $\Delta A_6 = D$. Ograniczeniem tego obszaru jest linia $\Delta A_6/D = 1$ dla odległości $z = 0+4N$ i linia $\Delta A_6/D = z/(4 \cdot N)$ dla $z > 4N$.

Obszar ③ obejmuje wyniki dla reflektorów $d = 0+3,7D$.

Obszar ④ nie zawiera żadnych wyników dla reflektorów płaskich.

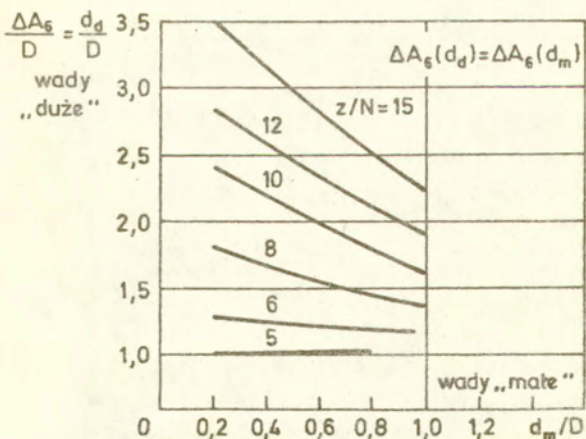
Każdemu z przedstawionych na rys.20 obszarów odpowiadają różne możliwości wykorzystania krzywej $H(A)$ do oceny wielkości wady. W obszarze ① długość przesuwu głowicy nie jest proporcjonalna do wymiaru wady i $\Delta A_6 > d$. Przykładowo, w odległości $z=2N$, długość przesuwu głowicy dla reflektora $d=0,2D$ jest 3,5 raza dłuższa niż wymiar reflektora d .

W obszarze tym jest natomiast spełniony warunek $\Delta A_6/D < 1$ dla reflektorów $d < D$, czyli nie zachodzi niebezpieczeństwo przecenienia wielkości wady.

Obszar ② to obszar stosowania metody PP_{6dB} , w którym $\Delta A_6 = d$. Mieszczą się w nim propozycje ograniczenia metody, zaznaczone /jednak bez sprecyzowania granic obszaru/ w szeregu prac / [92], [93], [99] i inne/.

Obszar ③ obejmuje reflektory w szerokim zakresie wielkości. Leżą w nim wyniki pomiarów dla reflektorów $d \gg D$, dla których długość przesuwu głowicy jest równa wymiarowi wady i które można metodą PP_{6dB} oceniać oraz wyniki dla reflektorów małych, z długościami przesuwu zależnymi od odległości z . Przykładowo, tej samej długości przesuwu głowicy ΔA_6 odpowiada w tym obszarze reflektor $d=0,2D$ i reflektor $d=3,4D$ czyli 17-krotnie większy.

Wielkości reflektorów „dużych” i „małych” z obszaru ③, leżących w tej samej odległości od przetwornika, dla których długości przesuwu głowicy są równe pokazano na rys.21.



Rys.21. Wielkości reflektorów dużych i małych, dla których długości przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o 6dB są jednokowe /obszar ③ rys.20/.

Obszar ④ pokazany na rys.20 nie zawiera wyników badania metodą PP wad płaskich. W zakresie odległości $z > 8N$ jego ograniczenie stanowi niezmienna z odległością długość przesuwu głowicy dla granicznej wady $d_{gr} = 16D$.

Ewentualne wskazania w tym obszarze pochodzić mogą jedynie od wad rozległych, niepłaskich, ukształtowanych w formie reflektora skupiającego.

4.4.2 Możliwości rozróżniania wad „dużych” od „małych”

Istnieją dwie możliwości rozróżniania wad i w przypadku gdy wykryta wada jest wadą „dużą” oceny jej rozmiaru metodą PP. Pierwsza to wykorzystanie bezwzględnej wartości amplitudy echa wady, czyli metody OwR, do przybliżonego oszacowania wielkości wady i zakwalifikowania jej do grupy wad „dużych” lub grupy wad „małych”.

Drugą możliwość stwarza wykorzystanie zmian czasu przejścia impulsu podczas przesuwu głowicy po powierzchni materiału. Wykorzystana może być długość przesuwu przetwornika odpowiadająca wzrostowi czasu przejścia impulsu o określoną wartość, będąca funkcją szerokości wady, odległości pomiędzy przetwornikiem a wadą i prędkości propagacji fal podłużnych w badanym materiale

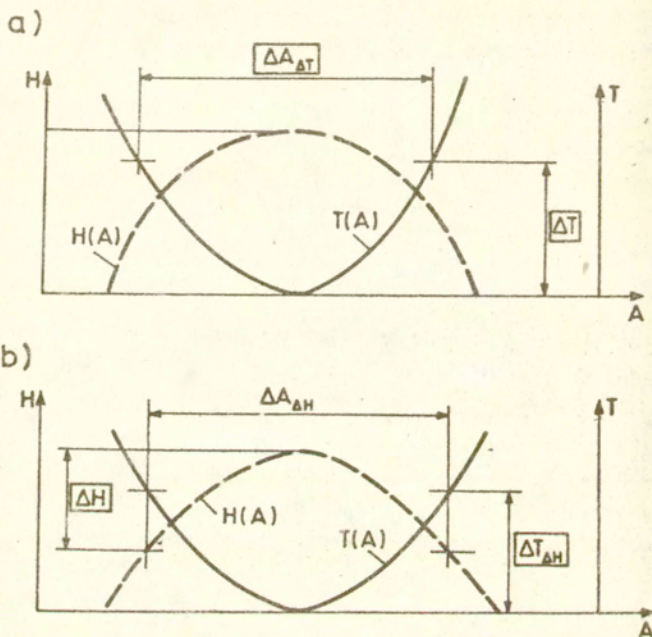
$$\Delta A_{\Delta T} = f(d, z, c_L)$$

lub też przyrost czasu przejścia odpowiadający długości przesuwu głowicy przy określonym spadku poziomemu echa

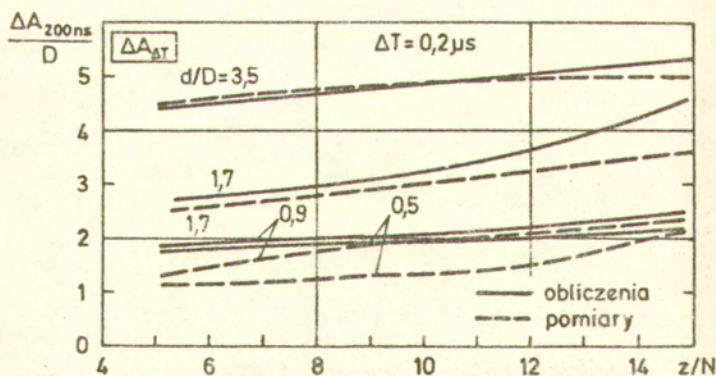
$$\Delta A_{\Delta H} = f(d, z, c_L)$$

Schemat pomiarów $\Delta A_{\Delta T}$ oraz $\Delta A_{\Delta H}$ pokazano na rys.22. Obliczone i zmierzone unormowane długości przesuwu przetwornika odpowiadające przyrostowi czasu przejścia impulsu o $\Delta T = 200$ ns przedstawia rys.23. Wyniki odpowiadają doświadczeniu przeprowadzonemu zanurzeniowo i obliczeniom

przy danych $D=5,9$ mm, $f=1,7$ MHz, $z=5+15N$, $d=0,5+3,5D$.

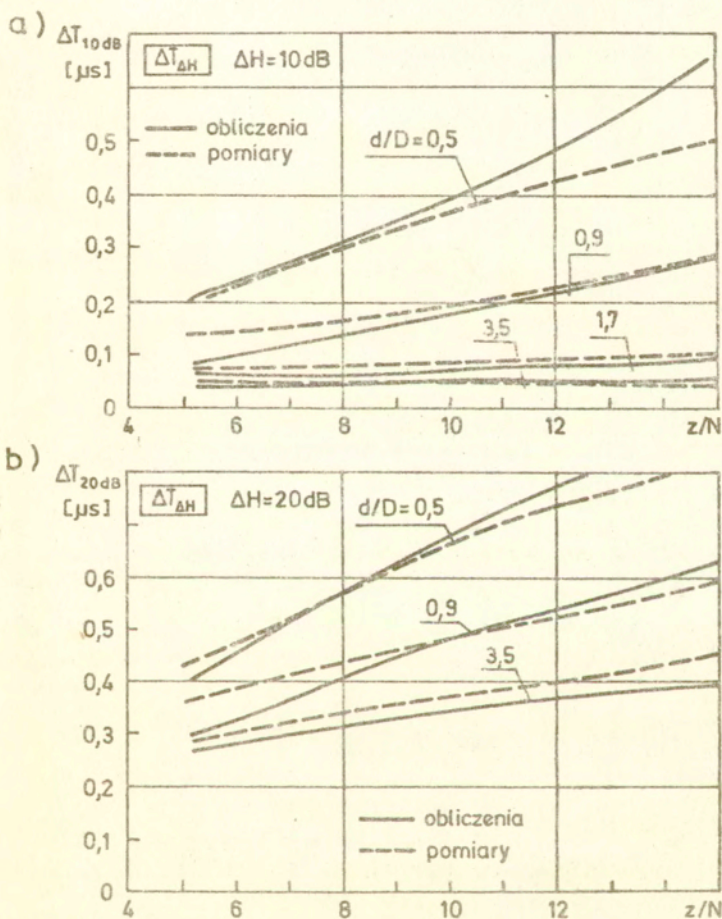


Rys.22. Schemat pomiarów przesuwu głowicy dla określonego przyrostu czasu przejścia impulsu /a/ i przyrostu czasu przejścia dla określonego spadku amplitudy /b/.



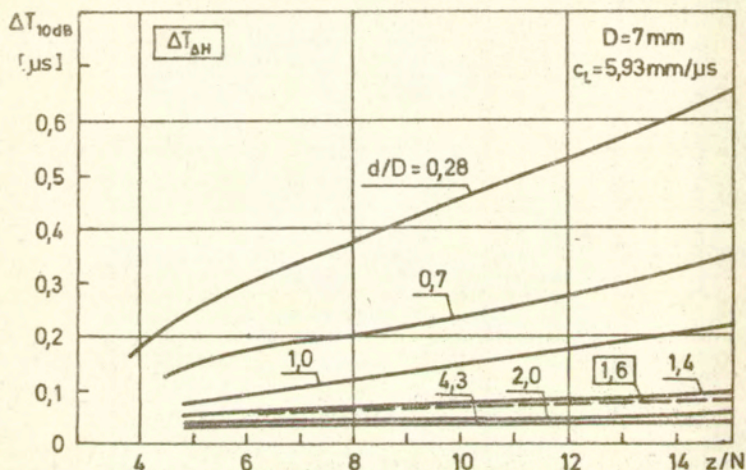
Rys.23. Długości przesuwu głowicy odpowiadające przyrostowi czasu przejścia impulsu o $\Delta T=200$ ns.

Na rys.24 a i b pokazano obliczone i zmierzone wartości przyrostów czasu przejścia ΔT dla spadków amplitudy echa o $\Delta H=10$ i 20dB dla podanych powyżej parametrów /woda/. Linie ciągłe na rys.23 i 24 odpowiadają wynikom obliczeń a linie przerywane – pomiarów.



Rys.24. Przyrosty czasu przejścia impulsu dla spadków amplitudy echa wady o 10dB /a/ i o 20dB /b/.

Rys.25 przedstawia, podobnie jak rys.24, obliczone wyróżności przyrostu czasu przejścia impulsu ΔT dla spadku amplitudy echa $\Delta H=10\text{dB}$ ale dla stali, o prędkości propagacji fal podłużnych $c_L=5,93\text{ mm/}\mu\text{s}$. Parametrem linii jest unormowana wielkość wady a linią przerywaną zaznaczono wartość ΔT dla granicznej wielkości wady w obszarze ③, $d_{gr}=1,6$.



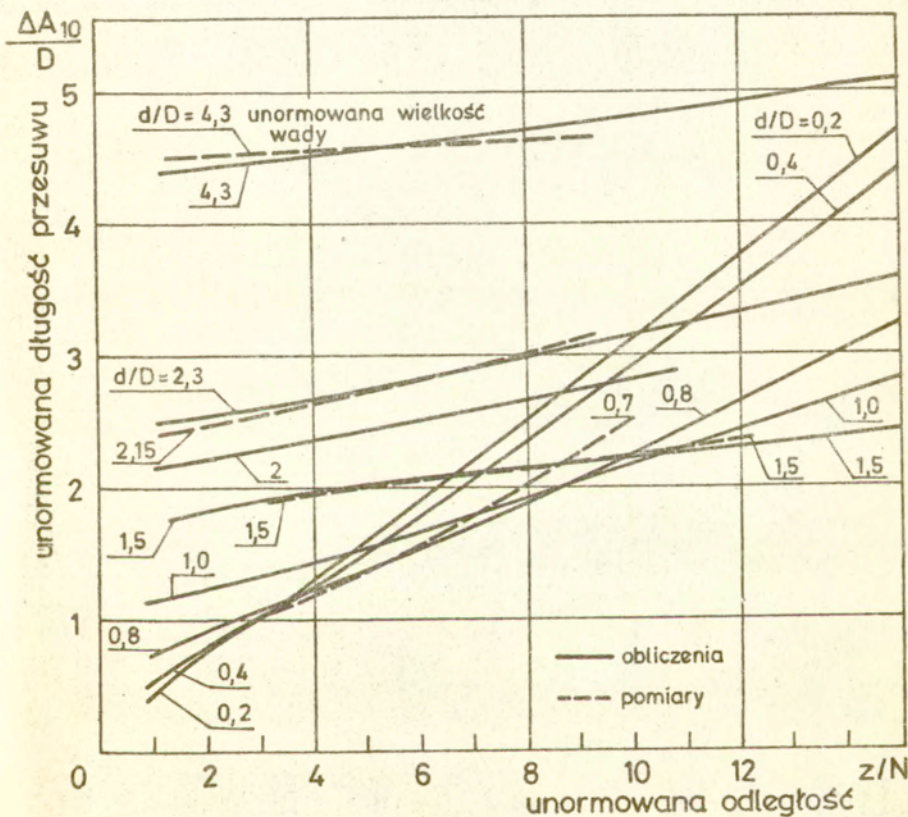
Rys.25. Obliczone przyrosty czasu przejścia impulsu dla spadku amplitudy echa o 10dB dla wad o różnych wielkościach w stali.

4.4.3 Długości przesuwu głowicy przy spadku amplitudy o 10 i 20 dB

Schemat pomiaru długości przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o $\Delta H > 6\text{dB}$ i uwzględniania poprawki b_s przy ocenie wielkości wady pokazano na rys.1.

Unormowane zależności długości przesuwu od wielkości reflektora i odległości głowica reflektor, dla $\Delta H=10$ i $\Delta H=20\text{dB}$ pokazano na rys.26 i 27. Linie ciągłe odpowiadają wynikiem obliczeń numerycznych a przerywane – pomiarów.

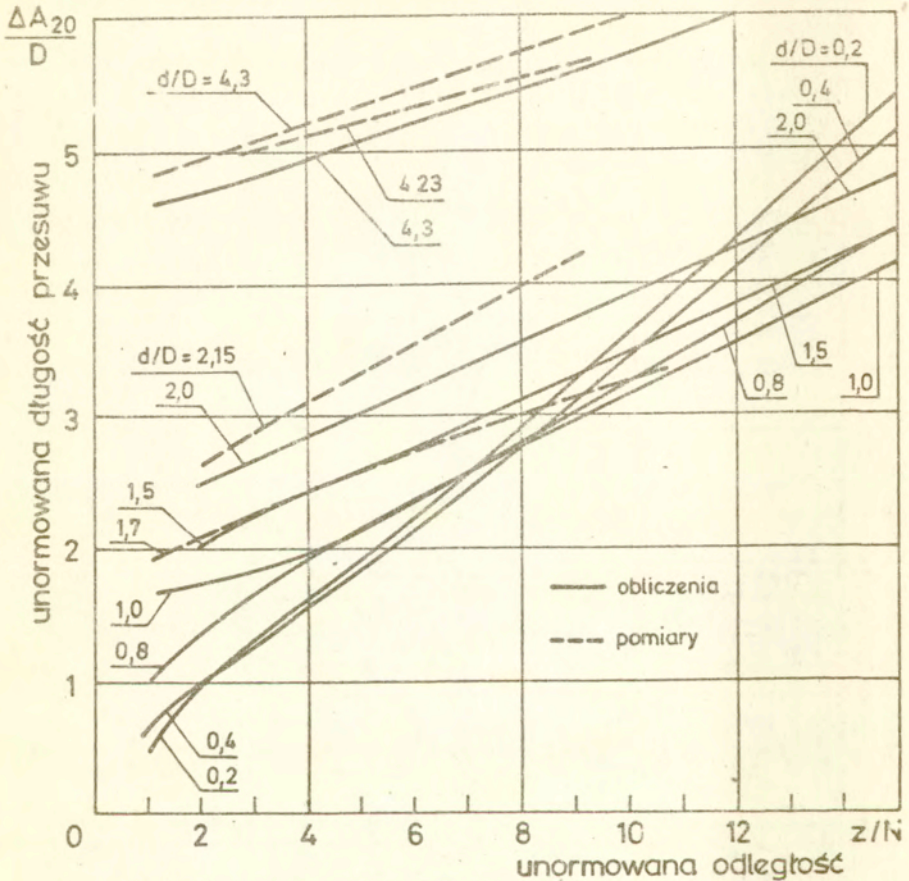
Widoczne są większe różnice pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów niż w przypadku $\Delta H = 6\text{dB}$ /rys.19/. Zmierzone wartości $\Delta A_{\Delta H}$ przewyższają wartości obliczone tym bardziej im większy jest spadek amplitudy echa wady. Przyczynami różnic są niedokładności modelu obliczeniowego dla promieni odległych od osi wiązek fal przetwornika i reflektora.



Rys.26. Unormowane zależności długości przesuwu głowicy od odległości dla spadku amplitudy echa o 10dB.

Podobnie jak dla spaku amplitudy echa o $\Delta H = 6\text{dB}$, pola wykresów pokazanych na rys.26 i 27 podzielić można na cztery obszary, w których długości przesuwu głowicy i wielkości

reflektorów spełniają pewne ograniczenia.

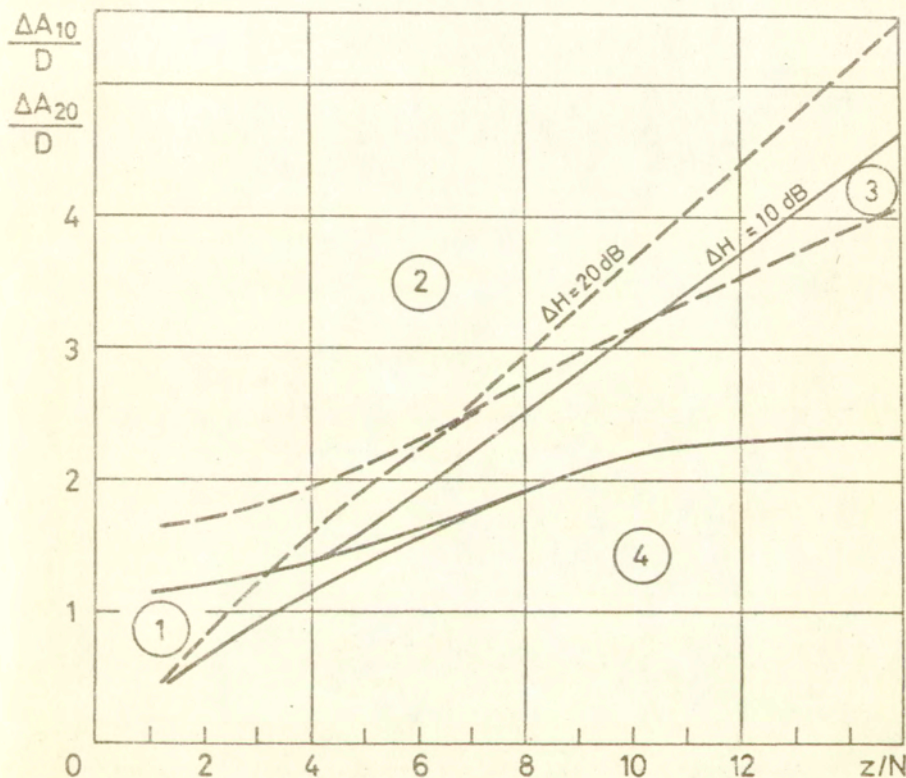


Rys.27. Unormowane zależności długości przesuwu głowicy od odległości dla spadku amplitudy echa o 20dB.

Obszary te schematycznie pokazuje rys.28. Linia ciągła odpowiada na nim granicom obszarów dla $\Delta H=10\text{dB}$ a linia przerywana - dla $\Delta H=20\text{dB}$. W obszarze ① mieszczą się wyniki badania reflektorów spełniających warunek $d < D$.

Obszar ② obejmuje wskazania dla reflektorów $d \geq D$ i stanowi obszar stosowania metody PP przy $\Delta H > 6\text{dB}$ z uwzględnieniem poprawek b_s . Obszar ③ /podobnie jak na rys.20/ zawiera wyniki badania wad o różnych wielkościach. Dla przyjętego zakresu odległości i spadku amplitudy echa o $\Delta H=10\text{dB}$

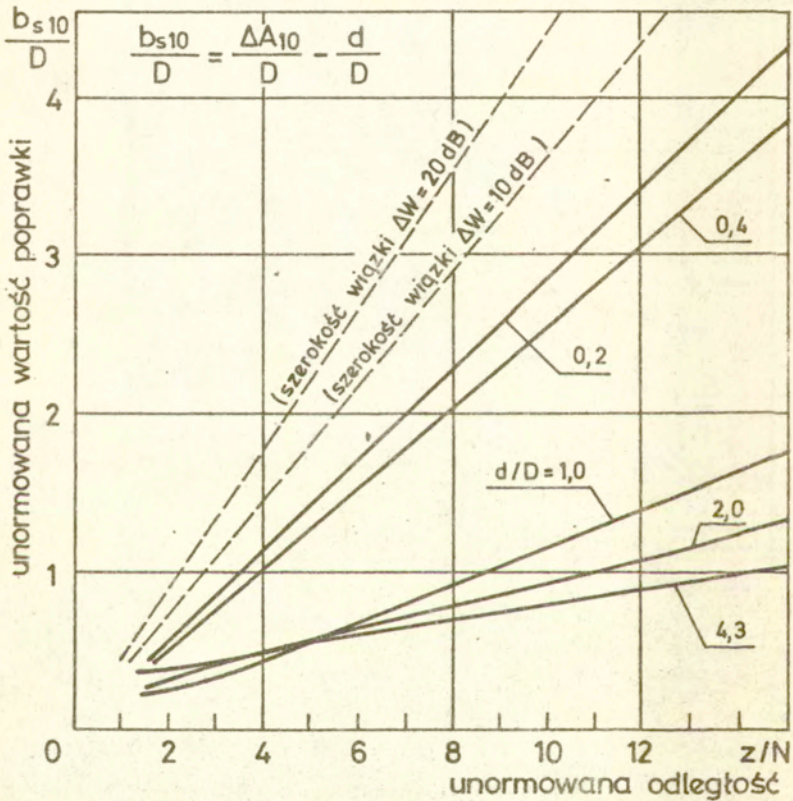
mieszczą się w nim wyniki dla reflektorów $d = 0 + 3D$, a dla $\Delta H = 20\text{dB}$ odpowiednio $d = 0 + 2,8D$.



Rys.28. Charakterystyczne obszary zależności długości przesuwu głowicy od odległości dla spadków amplitudy echa o 10 i 20dB.

Obszar ④ nie zawiera wyników pomiarów długości przesuwu uzyskanych na wadach płaskich. Możliwe jest rozróżnienie wad „małych” od „dużych” metodami opisanymi w rozdziale 4.4.2. W porównaniu z rys.20 /obszary dla $\Delta H = 5\text{dB}$ / widoczne jest niez. aczne zawężenie zakresów wielkości reflektorów mieszczących się w obszarze ③, w którym długości przesuwu głowicy dla wad „małych” i „dużych” mogą być takie same.

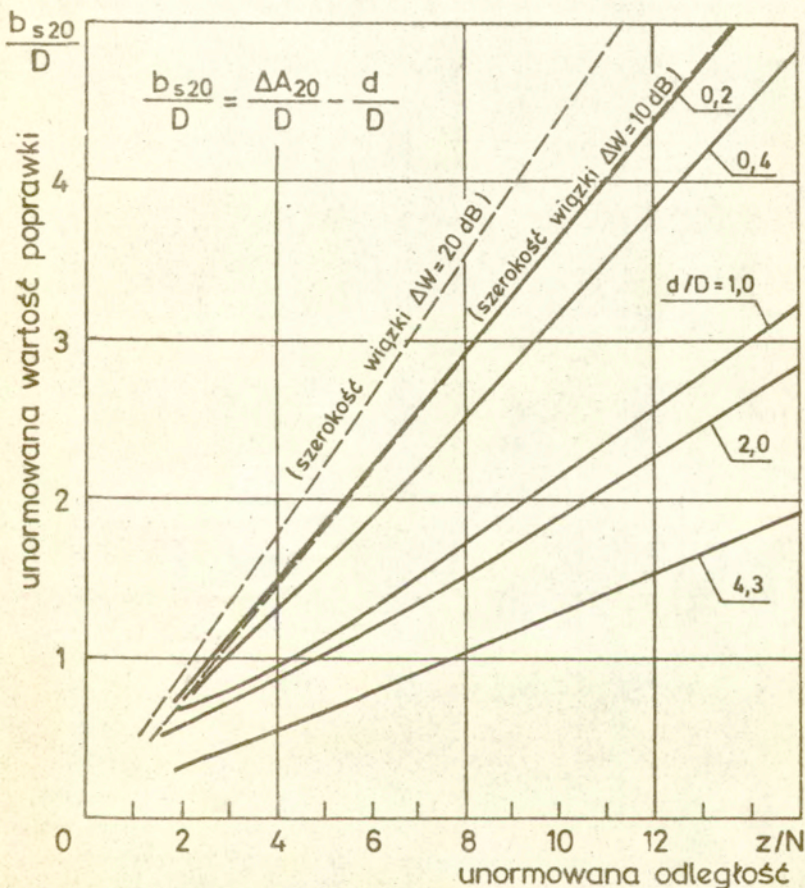
Przedstawione na rys.26 i 27 długości przesuwu głowicy są dla wszystkich reflektorów większe od wymiaru reflektora. Różnica długości przesuwu i wymiaru reflektora nazywana jest poprawką na skuteczną szerokość wiązki i w polskiej literaturze określana symbolem b_s . Dla spadków amplitudy echa o $\Delta H=10$ i 20dB obliczone wartości poprawek pokazano na rys.29 i 30. Przedstawiają one unormowane zależności b_s/D od odległości z/N dla reflektorów o różnych wielkościach d/D .



Rys.29. Obliczone wartości poprawek dla wad o różnych wielkościach i dla spadku amplitudy echa o 10dB.

Dla porównania, linią przerywaną pokazano na wykresach szeroko-

kości wiązki fal generowanych przez przetwornik przy spadku ciśnienia akustycznego o $\Delta W = 10$ i 20 dB. Widać, że szerokość wiązki wyznaczona spadkiem ciśnienia akustycznego fal jest wyraźnie większa od wielkości poprawki b_s nawet dla małych, płaskich wad.



Rys. 30. Obliczone wartości poprawek dla wad o różnych wielkościach i spadku amplitudy echa o 20dB.

Zaobserwować można praktycznie liniową zależność wartości poprawki od odległości oraz silną zależność jej wartości od wielkości reflektora. W odróżnieniu od przypadku gdy $\Delta H = 6$ dB

i $b_s = 0$, dla wad o wielkościach $d \geq 1,6$, przy wyższych spadkach amplitudy echa wartość poprawki zależna jest również od wielkości „dużego” reflektora. Widoczne jest to szczególnie przy spadku amplitudy echa o $\Delta H = 20\text{dB}$ /rys.30/.

Przykładowo dla odległości $z/N = 12$, dla wady o wielkości $d/D = 2$ poprawka wynosi $b_s = 2,3D$ a dla wady $d/D = 4,3$ wartość poprawki jest o około 30% mniejsza i wynosi $b_s = 1,6D$.

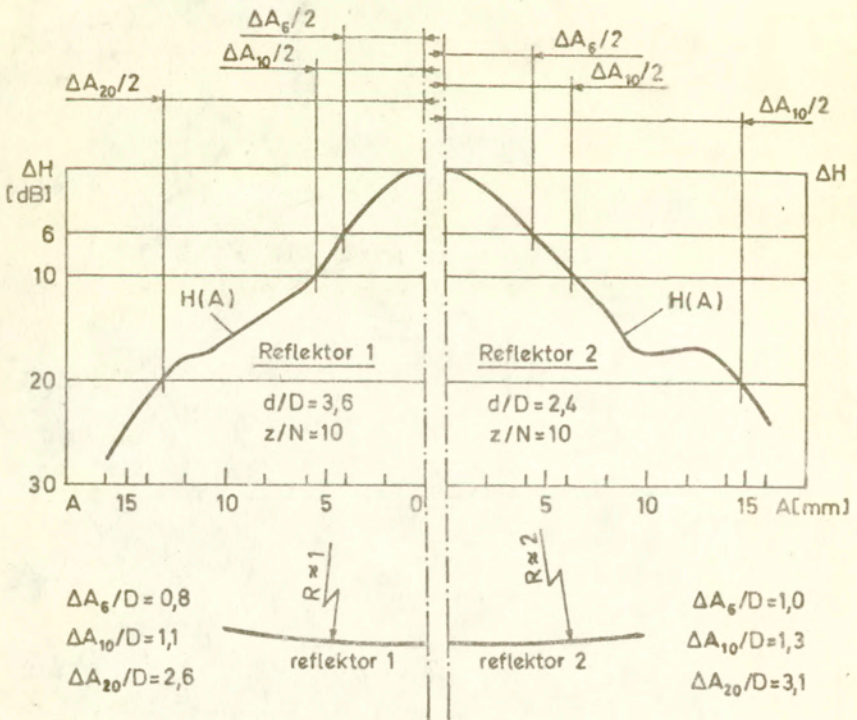
Wartość poprawki rośnie proporcjonalnie do odległości, wzrasta ze zwiększaniem spadku amplitudy echa oraz rośnie ze spadkiem wielkości wady, nawet dla reflektorów wielokrotnie szerszych niż wymiar przetwornika. Tak więc zapisać można

$$b_s = b_s(z, \Delta H, d, D, f, c_L)$$

Proponowany w niektórych pracach sposób doświadczalnego lub obliczeniowego wyznaczania poprawek w oparciu jedynie o charakterystykę kierunkowości wiązki fali głowicy prowadzić może do znacznego zaniżenia wielkości wykrytej płaskiej wady „dużej”. Wadą taką może być niebezpieczne pęknięcie lub rozwarstwienie.

Stosowania doświadczalnego wyznaczania poprawki na płaskich wadach sztucznych [100] wymaga zaś stosowania reflektorów o różnych wielkościach lub jednego, odpowiednio dużego reflektora, co zabezpiecza przed zaniżeniem wyznaczanych metodą PP wielkości dużych, płaskich wad.

Stwierdzono poprzednio, że wyniki badania wad mieszczące się w obszarze ④ zależności $\Delta A(d, z)$ /rys.20 i 28/ pochodzą od niepłaskich, dużych reflektorów skupiających a stosowanie metody PP do oceny ich wielkości prowadzi do znacznego zaniżania wielkości wady. Na rys.31 przedstawiono połowy obliczonych krzywych $H(A)$ dla dużych reflektorów skupiających o promieniu krzywizny równym w przybliżeniu odległości głowica reflektor. Długości przesuwu głowicy dla tych reflektorów dla $\Delta H = 5\text{dB}$ umiejscawiają te wady w obszarze ④ rysunku 20, dla $\Delta H = 10\text{dB}$ odpowiednio w obszarze ④ rysunku 28 a dla $\Delta H = 20\text{dB}$ w obszarach ③ i ④ rysunku 28. Potwierdza to koncepcję przyporządkowania wad tego typu obszarowi ④ zależności $\Delta A(d, z)$.



Rys. 31. Obliczone krzywe $H(A)$ /połowy/ reflektorów skupiających, leżących w odległości $z=10$ od głowicy.

4.4.4 Minimalna odległość pomiędzy ścianą boczną a wadą

Opisywane dotąd wady umiejscowione były w ośrodku nieograniczonym lub leżały w znacznej odległości od powierzchni ograniczających badany ośrodek. Kształt krzywych $H(A)$ dla tych wad nie był zaburzany przez odbicia fal od bocznych powierzchni ośrodka.

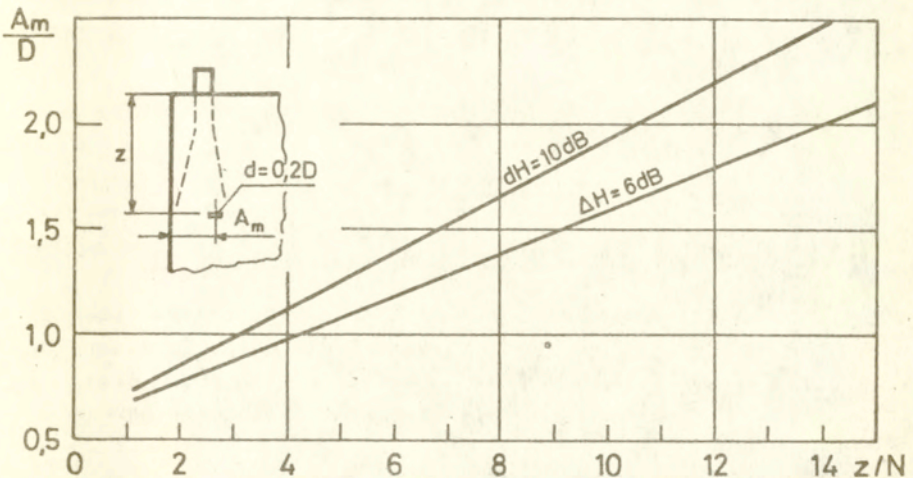
Dla wad usytuowanych w pobliżu bocznej ściany, szczególnie dla wad małych, występować mogą podczas ich badania metodą PP, dwa rodzaje utrudnień.

Dla głowic generujących w materiale impulsy o krótkich

czasach trwania /np: wysoka częstotliwość rezonansowa przetwornika/ niemożliwy staje się pomiar długości przesuwu głowicy ze względu na krawędź materiału ograniczającą powierzchnię przesuwu głowicy.

Inne utrudnienie występować może dla głowic generujących impulsy o długim czasie trwania. Możliwa jest wtedy interferencja impulsów rozchodzących się pomiędzy przetwornikiem a wadą różnymi drogami, z odbiciem fal od powierzchni ściany bocznej, zniekształcająca krzywą $H(A)$.

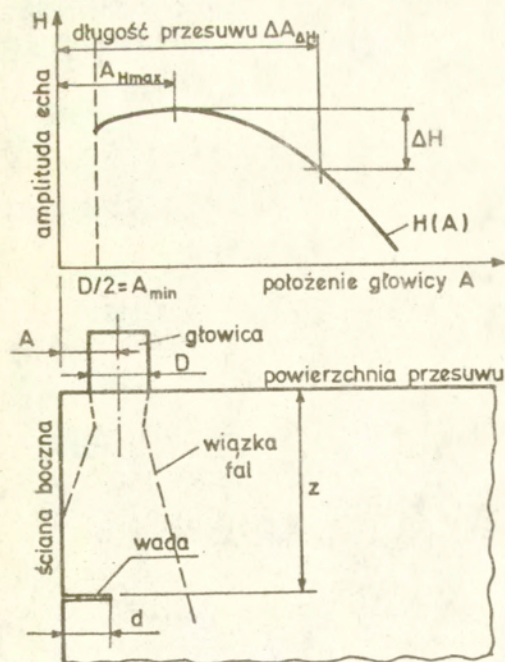
W praktyce badań ultradźwiękowych spotkać można się jedynie z pierwszym z wymienionych utrudnień /ze względu na krótkie czasy trwania impulsów generowanych przez głowicę i niskie wartości ciśnień akustycznych impulsów odbitych od bocznej ściany/. Na rys.32 pokazano obliczone wartości minimalnej odległości A_m pomiędzy płaską wadą a boczną ścianą, dla których krzywe $H(A)$ są niezniekształcone a długości przesuwu głowicy przy spadkach amplitudy echa o $\Delta H = 6$ i 10 dB są mierzalne.



Rys.32. Minimalne odległości pomiędzy płaską wadą a boczną ścianą, przy których krzywe $H(A)$ dla wady $d = 0,2D$ są niezniekształcone.

4.5 Wyniki badań zależności amplituda-położenie głowicy dla wad rozpoczynających się od bocznej ściany

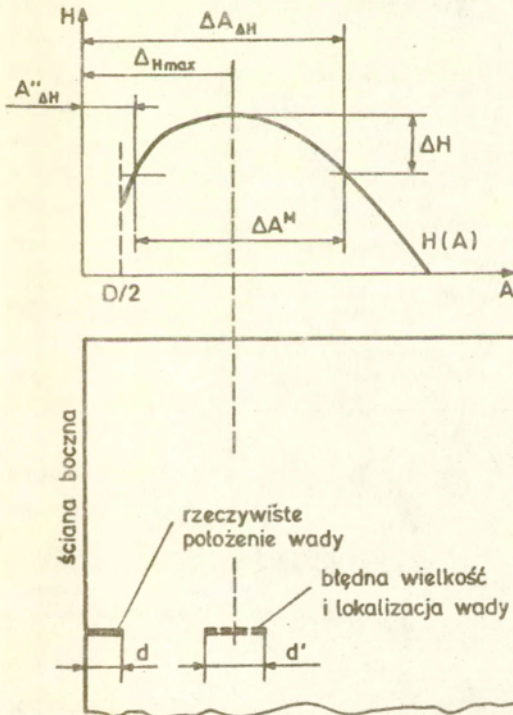
Schemat badania płaskich wad rozpoczynających się od bocznej powierzchni materiału i tworzących z nią prostokątne naroże przedstawiono na rys.33. Obszar przesuwu głowicy jest w tym przypadku ograniczony a minimalna wartość współrzędnej A określającej położenie środka przetwornika względem bocznej ściany wynosi $A_{min} = D/2$.



Rys.33. Schemat badania wad rozpoczynających się od bocznej powierzchni materiału.

Obecność rozległego, płaskiego reflektora jakim jest swobodna powierzchnia ośrodka /boczna ściana/ wpływa na kształt i położenie maksimum krzywej $H(A)$. Prowadzić to może do błędnej oceny wielkości wady i jej położenia co schematycz-

nie pokazano na rys.34.

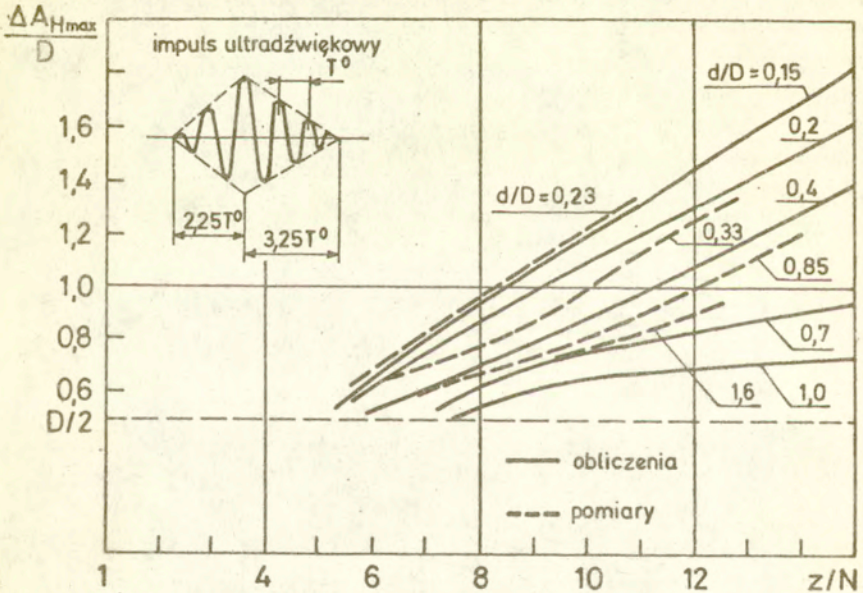


Rys.34. Możliwośći błędnej oceny wielkości i położenia wady.

Położenia przetwornika A_{Hmax} , przy których uzyskuje się maksymalną amplitudę echa wady pokazano na rys.35. Przedstawia on zależność unormowanej odległości A_{Hmax}/D od odległości z/N , dla różnych wielkości reflektorów d/D . Linie ciągłe odpowiadają wynikom obliczeń, przerywane – wynikom pomiarów. Obliczone wartości A_{Hmax} są niższe od zmierzonych. Wynika to z przyjęcia uproszczonego modelu obliczeniowego oraz z faktu, że dla współrzędnej A bliskiej A_{Hmax} wartość amplitudy echa zmienia się nieznacznie ze zmianami położenia przetwornika.

Zarówno wyniki pomiarów jak i obliczeń wskazują na tendencję

wzrostu A_{Hmax} ze wzrostem odległości z i spadkiem szerokości wady.



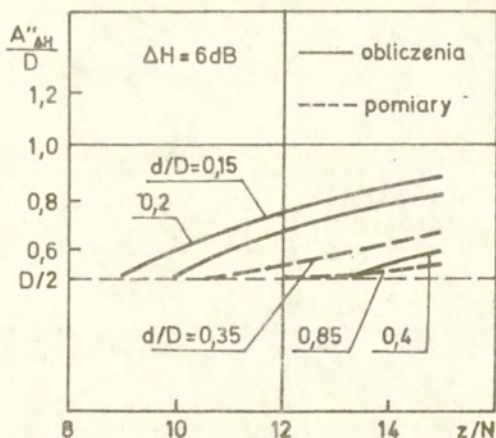
Rys.35. Położenia środka przetwornika dla maksymalnej amplitudy echa dla wad rozpoczynających się od bocznej ściany.

Zmiany A_{Hmax} zależą też od kształtu i czasu trwania impulsu ultradźwiękowego. Zależności pokazane na rys.35 obliczone są dla impulsu z obwiednią o kształcie trójkąta i czasem narastania równym 2,25 okresu fali oraz czasem opadania równym 3,25 okresu. Kształt ten i czas trwania odpowiada w przybliżeniu parametrom impulsów generowanych w stali przez stosowane w badaniach ultradźwiękowych głowice wyposażone w piezoelektryczne przetworniki ceramiczne obciążone jednostronnie masami tłumiącymi.

W pewnych przypadkach obserwowany jest wyraźny spadek amplitudy echa dla wartości A bliskich $A = D/2$ i możliwe jest wyznaczenie współrzędnej położenia przetwornika $A''_{\Delta H}$,

co pokazano na rys.34. Współrzędna $A''_{\Delta H}$ oznacza położenie przetwornika w pobliżu krawędzi materiału, przy którym amplituda echa jest niższa o ΔH od maksymalnej.

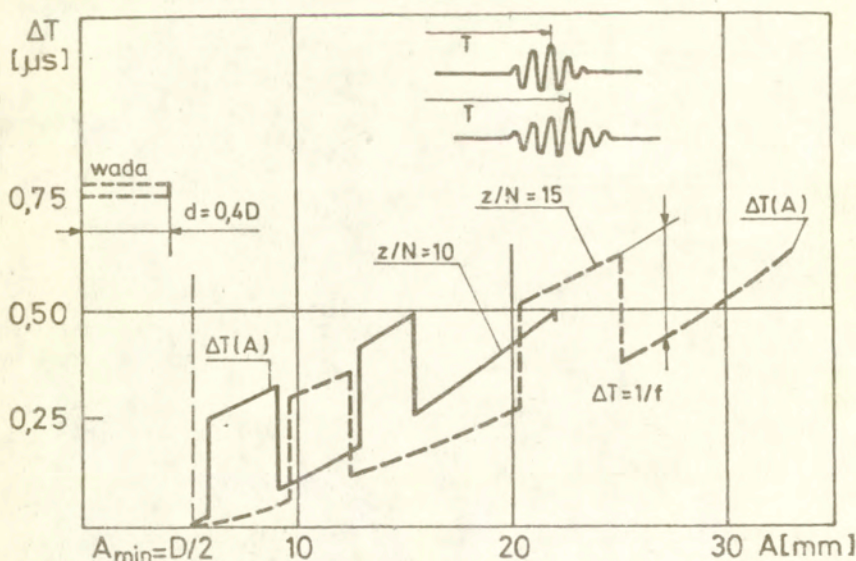
Sytuacja taka powoduje, że wada rozpoczynająca się od ściany bocznej uznana może być za wadę leżącą wewnątrz materiału a długość przesuwu głowicy mierzona błędnie jako $\Delta A^M = \Delta A_{\Delta H} - A''_{\Delta H}$ /patrz rys.34/. Obliczone i zmierzone wartości $A''_{\Delta H}$ dla wad o różnych wielkościach leżących w różnych odległościach od przetwornika, dla spadku amplitudy echa o $\Delta H = 6\text{dB}$ pokazano na rys.36.



Rys.36. Położenia środka przetwornika przy krawędzi materiału dla spadku amplitudy echa o 6dB.

Zależność amplitudy impulsu odbitego od wady od położenia przetwornika nie dostarcza wystarczających informacji dla rozróżnienia czy reflektor tworzy z powierzchnią boczną naroże czy też usytuowany jest w oddaleniu od niej. Rozróżnienie to przeprowadzić można wykorzystując zmiany czasu przejścia impulsu. Dla reflektorów rozpoczynających się od bocznej ściany czas przejścia narasta monotonicznie ze wzrostem odległości A , zaś dla reflektorów odsuniętych od

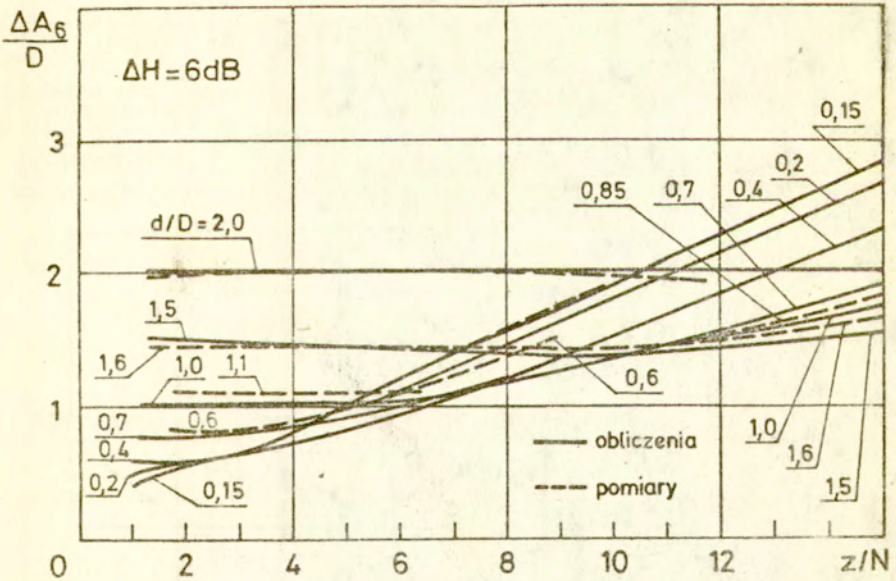
ściany osiąga minimum gdy przetwornik znajduje się ponad reflektorem. Na rys. 37 pokazano obliczone zmiany czasu przejścia ΔT dla reflektora o szerokości $d = 0,4 D$ leżącego w odległościach $z = 4, 10$ i $15 N$. Widoczne nieciągłości krzywych są wynikiem zmian kształtu odbieranego impulsu, spowodowanych interferencją impulsów rozchodzących się różnymi drogami. Skoki krzywych $\Delta T(A)$ równe są okresowi fali. Pokazane przebiegi $\Delta T(A)$ odpowiadają zakresowi przemieszczenia przetwornika, przy którym amplituda echa spada o $\Delta H = 30 \text{ dB}$ od wartości maksymalnej.



Rys. 37. Obliczone zmiany czasu przejścia impulsu dla wad rozpoczynających się od bocznej ściany, leżących w różnych odległościach od głowicy.

Dla wad rozpoczynających się od bocznej ściany, zależności długości przesuwu głowicy ΔA_6 od odległości dla reflektorów o różnych wielkościach przedstawione są na rys. 38. Długość przesuwu głowicy jest w tym przypadku mierzona od krawędzi materiału do punktu, w którym amplituda echa spada o 6 dB . Linie ciągłe na wykresie odpowiadają wynikom obliczeń

a linie przerywane – pomiarów przeprowadzonych na próbkach stalowych.



Rys. 38. Obliczone i zmierzone zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości reflektorów rozpoczynających się od bocznej ściany, dla $\Delta H = 6\text{dB}$.

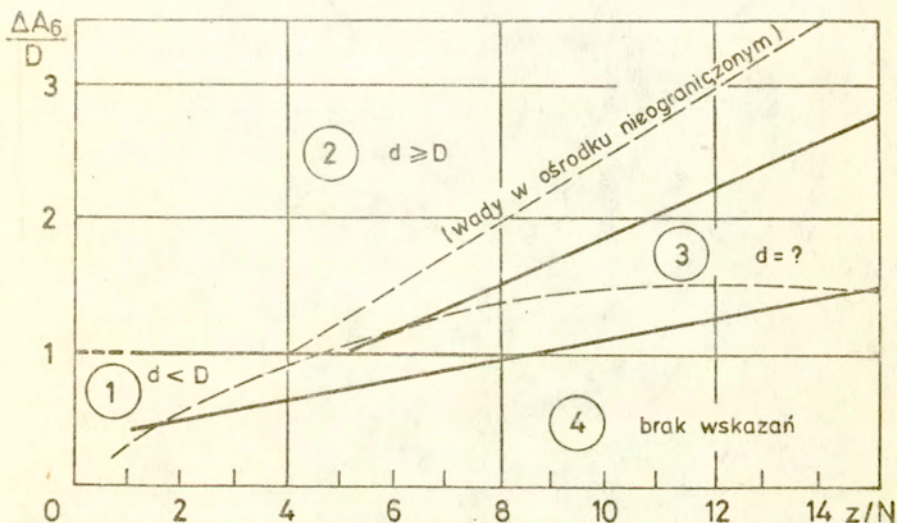
Podobnie jak dla wad w półprzestrzeni przyjąć można pewną graniczną wielkość reflektora, dla którego długość przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o 6dB nie zależy od odległości. Dla wad rozpoczynających się od bocznej ściany i przesuwu głowicy mierzonego według schematu pokazanego na rys. 33 wynosi ona $d_{gr} = 2D$.

Pole omawianego wykresu podzielić można na cztery obszary pokazane schematycznie na rys. 39. Ograniczenia na wielkości reflektorów i długości przesuwu głowicy w tych obszarach są następujące:

obszar ① — reflektory $d < D$, długości przesuwu głowicy $\Delta A_6 < D$ przy czym w odróżnieniu od wad w ośrodku nieograniczonym, długości przesuwu są proporcjonalne

do wymiaru wady,

obszar ② - reflektory $d \geq D$, długości przesuwu głowicy $\Delta A_6 = d$.
Jest to obszar powszechnego stosowania metody PP,



Rys. 39. Charakterystyczne obszary zależności $\Delta A(z, d)$ dla wad rozpoczynających się od bocznej ściany.

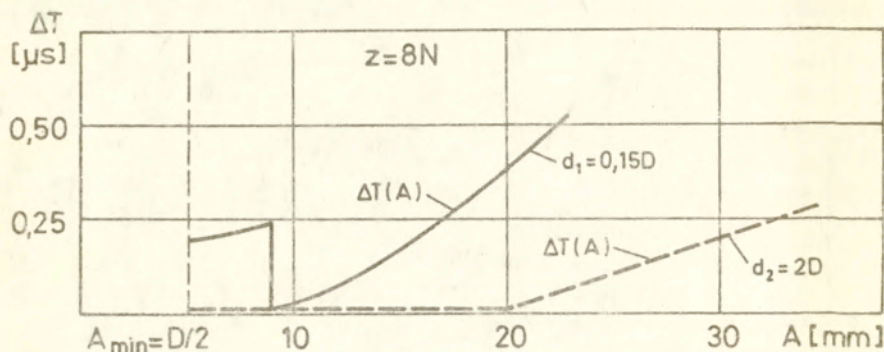
obszar ③ - reflektory $d = 0 + 3D$. W części tego obszaru leżą wyniki badania reflektorów „małych” i „dużych” /tzn. $d \geq 2D$ /. Przykładowo długości przesuwu głowicy dla wad $d = 0,15D$ i $d = 2D$, leżących w odległości $z = 10N$ są sobie równe,

obszar ④ - brak wskazań od płaskich reflektorów tworzących prostokątne naroże z boczną ścianą.

Do rozróżnienia wad „małych” od „dużych” w obszarze ③ wykorzystać można bezwzględną wartość amplitudy echa wady /czyli metodę OWR/ lub zmiany czasu przejścia impulsu.

Na rys. 40 pokazano obliczone zmiany czasu przejścia ΔT dla reflektorów $d = 0,15D$ i $d = 2D$ leżących w odległości $z = 8N$.

Zakresy przemieszczenia przetwornika odpowiadają spadkom amplitudy echa wad o 30dB od amplitudy maksymalnej.

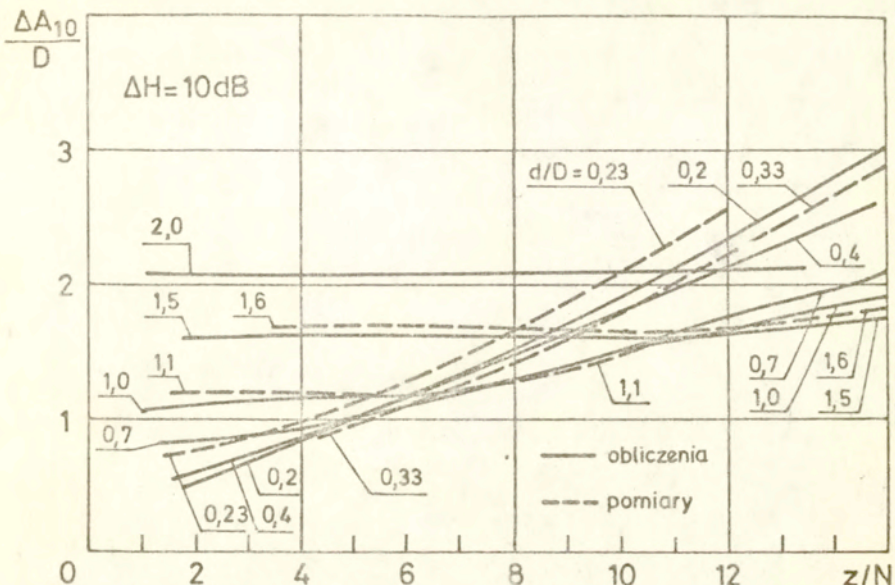


Rys.40. Obliczone zmiany czasu przejścia impulsu dla wad o różnych wielkościach, leżących w tej samej odległości od przetwornika.

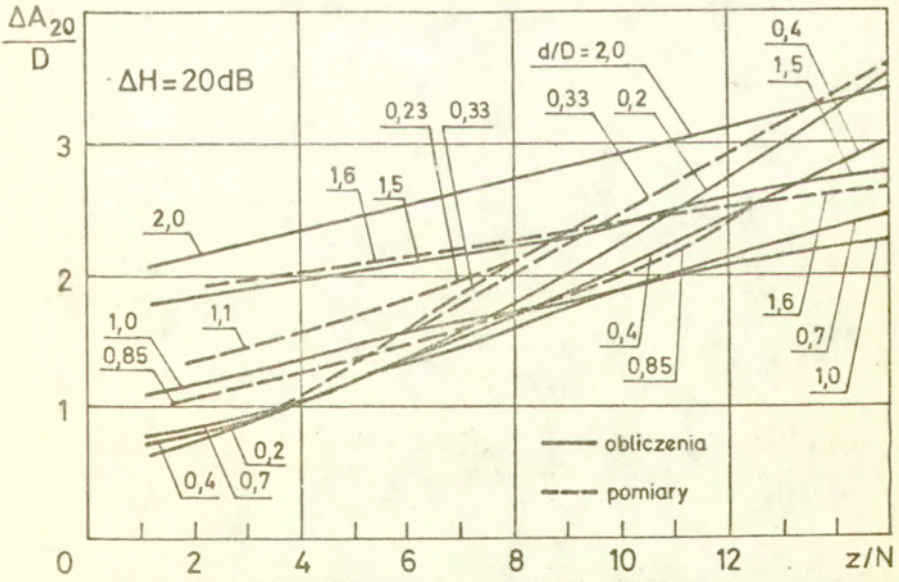
W obszarze ④ występować mogą jedynie wskazania pochodzące od wad niepłaskich, stanowiących reflektory skupiające lub od reflektorów płaskich nachylonych względem bocznej ściany.

Przyjęcie większego niż 6dB spadku amplitudy echa prowadzi do wzrostu długości przesuwu głowicy. Obliczone i zmierzone zależności długości przesuwu od odległości, dla spadków amplitudy echa o $\Delta H = 10$ i 20dB pokazano na rys.41 i 42. Podobnie jak dla wad położonych w ośrodku nieograniczonym, zmierzone długości przesuwu głowicy przewyższają wartości obliczone, szczególnie dla małych wad i większego spadku amplitudy echa wady. Przykładowo, dla wady $d = 0,2D$ leżącej w odległości $z = 8N$, obliczona długość przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o $\Delta H = 10$ dB, stanowi 95% długości zmierzonej. Odpowiednio, dla spadku amplitudy o 20dB, wartość obliczona stanowi 90% zmierzonej długości przesuwu głowicy.

Na rys.43 pokazano zależności poprawki b_s od odległości i wielkości wady /poprawka b_s jest różnicą pomiędzy długością przesuwu głowicy a wymiarem reflektora/. Linia ciągłą naniesiono na nim wartości poprawki odniesione do wielkości przetwornika dla spadku amplitudy echa o $\Delta H = 10$ dB a linią

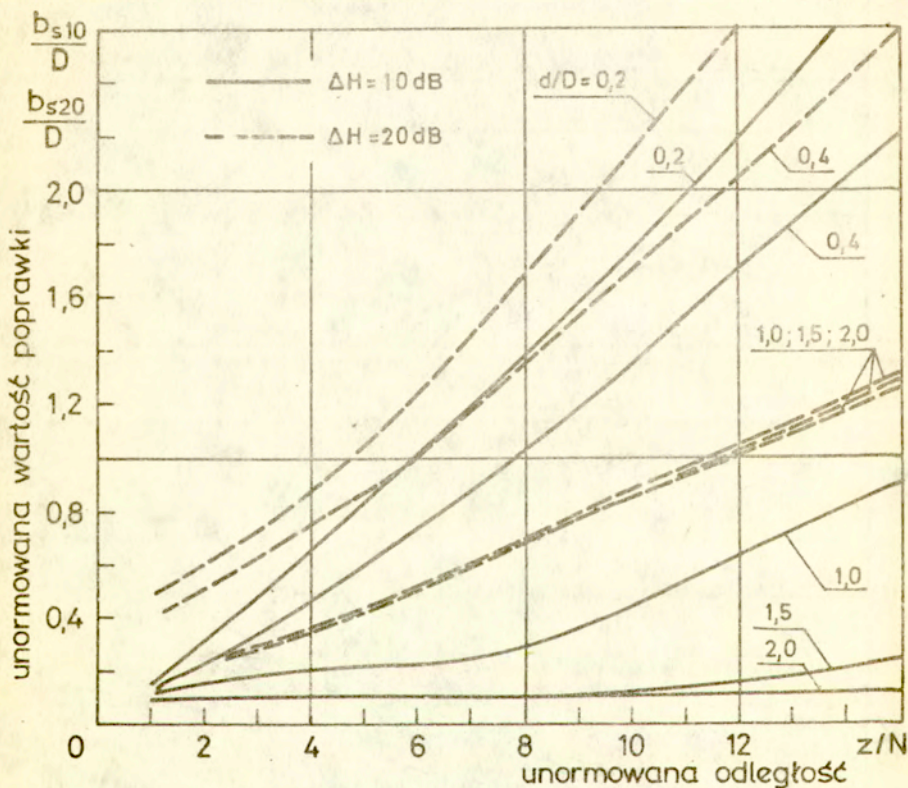


Rys.41. Zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości wady dla spadku amplitudy echa o $\Delta H = 10\text{dB}$.



Rys.42. Zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości wady dla spadku amplitudy echa o $\Delta H = 20\text{dB}$.

przerwaną — dla $\Delta H = 20\text{dB}$. Widoczna jest zależność wartości poprawki od odległości, spadku amplitudy echa i wielkości wady. Wartości poprawek są znacznie mniejsze niż w przypadku wad w ośrodku nieograniczonym /mierzona jest niejako połowa długości przesuwu głowicy/.

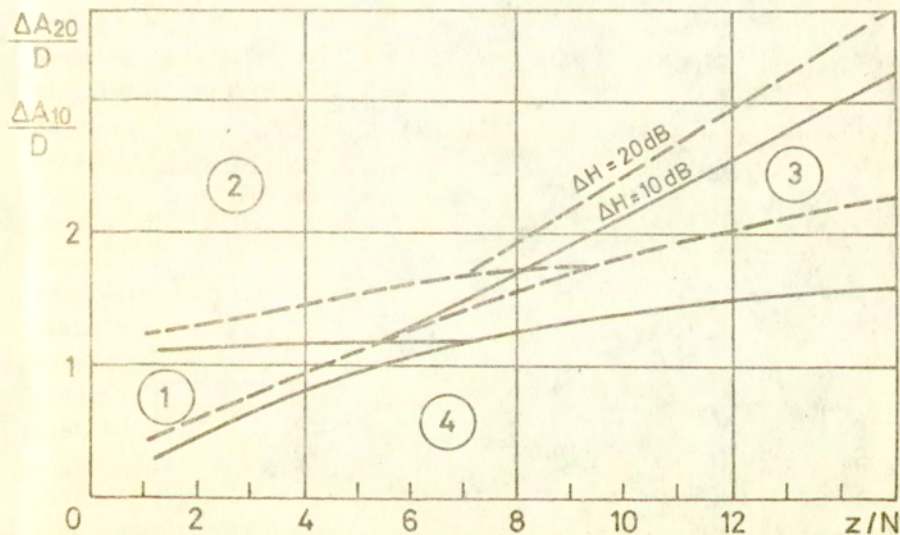


Rys.42. Zależności wartości poprawek b_s od odległości i wielkości wad dla różnych spadków amplitudy echa.

W przyjętym zakresie odległości, dla $\Delta H = 10\text{dB}$ poprawka b_s osiąga praktycznie stałą, niezależną od odległości i wielkości wady wartość dla reflektorów większych niż $d = 1,5D$. Dla spadku amplitudy echa o $\Delta H = 20\text{dB}$, dla wad $d \geq 1,5D$ poprawka zmienia się proporcjonalnie do odległości i nie zależy od wielkości wady.

Podobnie jak w przypadku wad w ośrodku nieograniczonym wartość poprawki jest więc funkcją wielkości reflektora. Widoczna jest jednak graniczna wielkość wady, powyżej której poprawka zależy już praktycznie tylko od spadku amplitudy echa wady i odległości.

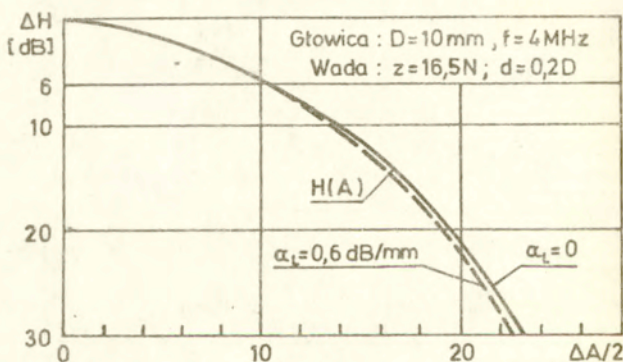
Pola wykresów pokazanych na rys.41 i 42 podzielone mogą być również na obszary przedstawione na rys.44, w których spełnione są opisane już wyżej ograniczenia na długości przesuwu głowicy i wielkości płaskich reflektorów.



Rys.44. Obszary wskazań dla wad rozpoczynających się od bocznej ściany materiału i dla spadków amplitudy echa wady o $\Delta H = 10$ i 20dB .

4.6 Wpływ tłumienia i chropowatości powierzchni wady na długość przesuwu głowicy

Tłumienie fal ultradźwiękowych może zniekształcać krzywą $H(A)$ i skracać długość przesuwu głowicy. Wpływ ten jest proporcjonalny do różnicy minimalnej /gdę oś wiązki trafia w reflektor/ i maksymalnej drogi impulsu w badanym materiale. Największych więc zniekształceń krzywych spodziewać się można dla małych wad leżących w znacznych odległościach od głowicy. Na rys.45 pokazano obliczone krzywe $H(A)$ dla wady $d=0,2D$ leżącej w odległości $z=16,5N$, dla ośrodka nietłumiącego $\alpha_L=0$ i o współczynniku tłumienia równym $\alpha_L=0,6\text{dB/mm}$. Tak wysoki współczynnik odpowiada skrajnym wartościom tłumienia spotykanym w gruboziarnistych stalach austenitycznych.



Rys.45. Połowy obliczonych krzywych $H(A)$ dla małej wady leżącej w ośrodkach o różnych współczynnikach tłumienia fal ultradźwiękowych.

Widoczna na rysunku różnica długości przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o $\Delta H=20\text{dB}$ wynosi 2,5% długości przesuwu w ośrodku nietłumiącym. Świadczy to o pomijalnie małym wpływie tłumienia fal, czy też jego lokalnych zmian w badanym materiale, na mierzone długości przesuwu głowicy.

Przedstawione w poprzednich rozdziałach zależności długości przesuwu głowicy od parametrów przetwornika i wady

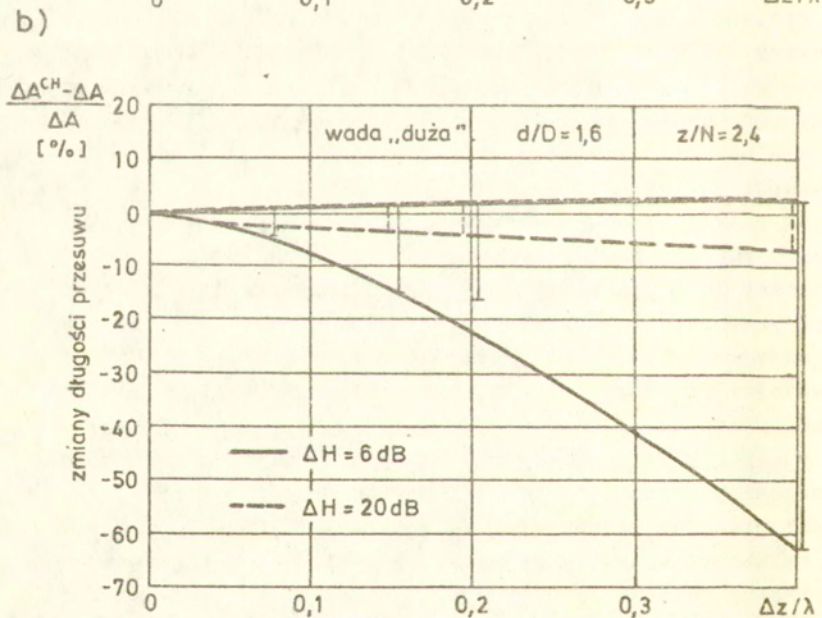
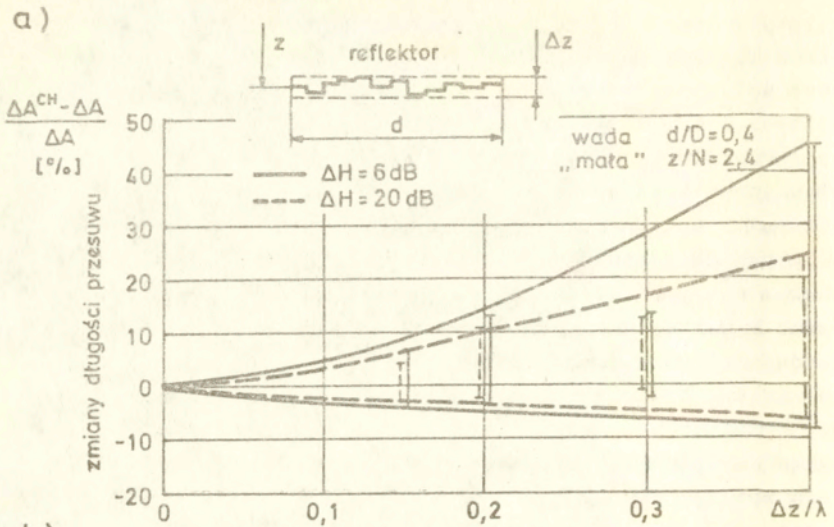
dotyczyły idealnych reflektorów płaskich. Rzeczywiste wady makrostruktury materiałów posiadają pewną chropowatość, która wpływa na rozkład ciśnienia akustycznego w wiązce fal odbitych i tym samym na kształt krzywej $H(A)$ oraz na długość przesuwu głowicy.

Wpływ chropowatości na krzywe $H(A)$ zbadano modelując numerycznie te krzywe dla reflektorów, których elementy odchyłone były o ΔZ od położenia wyznaczonych przez odległość $z = \text{const}$. Rozkład odchylenia ΔZ na szerokości reflektora zadawany był losowo a wartość ΔZ_{max} równa była maksymalnej wysokości nierówności powierzchni reflektora.

Wielokrotne obliczenia, dla różnych rozkładów odchylenia ΔZ przy ograniczonej jego maksymalnej wartości dają jakościowy pogląd na wpływ tak opisanego chropowatości na zmiany przebiegu krzywych $H(A)$.

Na rys. 46a i 46b pokazano obliczone zmiany długości przesuwu głowicy dla reflektorów o różnych chropowatościach. Na osi pionowej naniesiono różnicę długości przesuwu głowicy dla wady chropowatej ΔA^{Ch} i wady płaskiej ΔA wyrażoną w procentach a na osi poziomej - stosunek maksymalnej wysokości nierówności powierzchni wady ΔZ_{max} do długości fali λ w ośrodku. Linia ciągła obrazuje wyniki uzyskane dla spadku amplitudy echa o $\Delta H = 6\text{dB}$ a linia przerywana - dla $\Delta H = 20\text{dB}$.

Widoczny jest różny wpływ nierówności powierzchni na długość przesuwu głowicy dla reflektora „małego” / $d = 0,4D$ / i „dużego” / $d = 1,6D$ /. W przypadku wady „małej” wzrost chropowatości prowadzić może do znacznego wydłużenia przesuwu głowicy lub do nieznacznego skrócenia przesuwu /rys. 43a/. Przy odbiciu fal od wady „dużej” wzrost nierówności jej powierzchni prowadzić może do nieznacznego tylko wzrostu długości przesuwu głowicy lub do znacznego skrócenia przesuwu. Ta zależność wpływu nierówności powierzchni odbijającej od wielkości reflektora wiąże się z niemożnością uzyskania wąskiej wiązki fal, o małej rozbieżności, odbitej od reflektora małego. Charakterystykę kierunkowości wiązki fal odbitych od dużego reflektora płaskiego najsilniej rozszerzyć mogą zmiany przekroju wady na jej krawędziach /zaokrąglenia/



Rys.46. Wpływ chropowatości powierzchni reflektora na zmiany długości przesuwu głowicy:
a/ dla reflektora „małego” $d = 0,4 D$
b/ dla reflektora „dużego” $d = 1,6 D$.

upodabniająca ją do wady typu objętościowego. Nie jest to jednak możliwe w przypadku małych nierówności powierzchni rozpatrywanych w pracy.

Przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić, że praktycznie długość przesuwu głowicy dla wady chropowatej nie zmienia się więcej niż o 10% długości przesuwu dla wady płaskiej jeśli chropowatość powierzchni reflektora nie przekracza 0,1 długości fali.

4.7 Wnioski dotyczące głowic normalnych

1. W przyjętym w pracy zakresie odległości pomiędzy przetwornikiem a wadą określić można minimalną, graniczną wielkość płaskiego reflektora leżącego w ośrodku nieograniczonym, dla którego długość przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o 6dB praktycznie nie zależy od odległości.

Wielkość ta wynosi $d_{gr} = 1,6 D$. wady płaskie o rozmiarach równych lub większych od d_{gr} mogą być oceniane metodą PP_{6dB} w całym zakresie odległości bez stosowania poprawek.

Dla przetworników kwadratowych lub prostokątnych funkcję normy odległości pomiędzy przetwornikiem a wadą spełnia wyrażenie $N = D^2 / (4 \cdot \lambda)$ gdzie D jest długością boku przetwornika równoległego do kierunku przesuwu głowicy. Wyrażenie to jest miarą kierunkowości wiązki fal w płaszczyźnie przesuwu przetwornika.

Dla odległości większych niż tak wyrażone cztery wartości N przesuwu głowic dla wad „dużych” /tzn. $d \geq d_{gr}$ / i wad „małych” / $d < d_{gr}$ / mogą mieć te same długości /obszar ③ na rys.20/. Możliwe jest rozróżnienie tych wad w oparciu o pomiar zmiany czasu przejścia impulsu lub długości przesuwu głowicy z nim związane i ocena wielkości wad „dużych” metodą PP_{6dB} bez stosowania poprawek.

Przedstawione na rys.18 i 20 zależności stosowane mogą być w praktyce również przy badaniach prowadzonych głowicami normalnymi z przetwornikami okrągłymi o średnicy D_0 . Normie

odległości pomiędzy przetwornikiem a wadą odpowiada w tym przypadku wyrażenie $N = 1,18 \cdot D_0^2 / (4 \cdot \lambda)$. Czynniki 1,18 uwzględnia zmiany długości przesuwu głowicy wywołane różnicami wiązek generowanych przez przetworniki okrągłe lub kwadratowe o tym samym wymiarze boku lub średnicy.

2. Stosowanie wyższych niż 6dB spadków amplitudy echa /np. $\Delta H = 10$ lub 20dB/ nieznacznie tylko zawęży zakres wielkości wad „dużych” i „małych”, którym odpowiadają przesuwu głowicy o tych samych długościach. Korzystanie z wyższych spadków amplitudy wymaga stosowania poprawek przy ocenie wielkości wad. Wartości tych poprawek zależą nie tylko od parametrów przetwornika i badanego materiału oraz od odległości /czyli szerokości wiązki fal generowanych przez przetwornik/ ale również od wielkości wady. Stosowanie poprawek obliczonych w oparciu o rozbieżność wiązki fal, wyznaczanych doświadczalnie na reflektorach kulistych, cylindrycznych lub małych reflektorach płaskich, prowadzić może do niebezpiecznego zaniżania wielkości dużych, płaskich wad ocenianych metodą PP. Możliwy jest taki wybór wielkości reflektora wzorcowego, aby niebezpieczeństwo to wyeliminować lub ograniczyć wielkość ewentualnego błędu popełnianego przy ocenie wielkości wady. Rozmiary płaskiego reflektora wzorcowego powinny być tym większe im większy spadek amplitudy echa przyjęto przy pomiarze przesuwu głowicy.

3. Niezależnie od przyjętego spadku amplitudy echa wady na wykresach pokazujących zależności długości przesuwu głowicy od rozmiaru wady i odległości, wydzielić można obszary, w których ewentualne wskazania nie pochodzą od płaskich, równoległych do powierzchni materiału wad /obszary ④/. Wskazania w tych obszarach pochodzą jedynie od „dużych” reflektorów o innej geometrii /np. skupiających/ a ich ocena metodą PP, przy użyciu głowic generujących rozbieżne wiązki, prowadzi do znacznego zaniżania wyznaczanego rozmiaru wady.

4. Obecność płaskiego, rozległego reflektora jakim jest boczna ściana badanego materiału wpływa na kształt krzywej $H(A)$. Wpływ ten prowadzić może do błędnej lokalizacji i nieprawidłowej oceny wielkości wady usytuowanej przy bocznej ścianie.

Zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości wady rozpoczynającej się od bocznej ściany są ilościowo różne niż w przypadku wad w ośrodku nieograniczonym.

Graniczna wielkość tak usytuowanej wady wynosi $d_{gr} = 2D$.

Inaczej też dla tych wad kształtują się wartości poprawek przy stosowaniu większych niż 6dB spadków amplitudy echa.

Aby wyeliminować możliwość zaniżania wielkości ocenianej wady, wielkość reflektora wzorcowego, służącego do pomiaru wartości poprawki, powinna być nie mniejsza niż $2D$.

Podobnie jak dla wad w ośrodku nieograniczonym, w zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości wady, wydzielić można obszar, w którym wskazania nie pochodzą od wad płaskich, prostopadłych do bocznej ściany i w którym stosowanie metody PP prowadzi do zaniżania wyznaczanych rozmiarów wad.

W odróżnieniu od wad w ośrodku nieograniczonym, krzywa $H(A)$ dla wady tworzącej z bocznią ścianą naroże, silnie zależy od czasu trwania i kształtu impulsu ultradźwiękowego /czyli np. od typu głowicy/.

5. Dla wad badanych stosowanymi w praktyce głowicami normalnymi, zmiany odległości pomiędzy przetwornikiem a reflektorem powstające podczas przesuwu głowicy na drodze pomiaru, nie wpływają na kształt krzywej $H(A)$. Płaski model obliczeniowy /rozdział 4.2/ nieskończenie długiego przetwornika i reflektora w postaci taśmy opisuje więc również krzywe $H(A)$ dla reflektorów prostokątnych o dowolnej /ograniczonej w praktyce wykrywalności/ długości d_y i mierzonej szerokości d , usytuowanych bokiem d równolegle do kierunku przesuwu przetwornika. Model ten opisuje też krzywe $H(A)$ uzyskiwane dla prostokątnych reflektorów wykrywanych prostokątnymi przetwornikami o szerokości D równoległej do kierunku przesuwu,

ponieważ skończone długości przetwornika i reflektora nie wpływają na charakterystyki kierunkowości wiązek fal w płaszczyźnie przesuwu.

W przypadku pomiaru długości przesuwu głowicy z przetwornikiem prostokątnym o bokach D_1 i D_2 , wartości wyrażenia N , które należy uwzględnić przy ocenie odległości przetwornikowa, będą różne w zależności od tego, który z boków przetwornika jest równoległy do kierunku przesuwu głowicy.

Ta sama wada może raz być reflektorem „dużym” a raz „małym” dla takiej głowicy. Stwarza to możliwość rozróżniania wad przy użyciu jednej głowicy z prostokątnym przetwornikiem.

6. Wpływ nierówności powierzchni wady na mierzone długości przesuwu głowicy zależny jest od stosunku wysokości nierówności do długości fali oraz od wielkości reflektora.

Wzrost chropowatości prowadzi w większości przypadków do wydłużenia przesuwu głowicy dla reflektorów „dużych” i skrócenia przesuwu dla reflektorów „małych”.

W przybliżeniu przyjąć można, że w zakresie odległości $z = 1 \div 15 N$, maksymalna wysokość nierówności $\Delta z_{max} < 0,1\lambda$ powoduje odchylenia długości przesuwu głowicy mniejsze niż 5% długości przesuwu dla reflektora płaskiego.

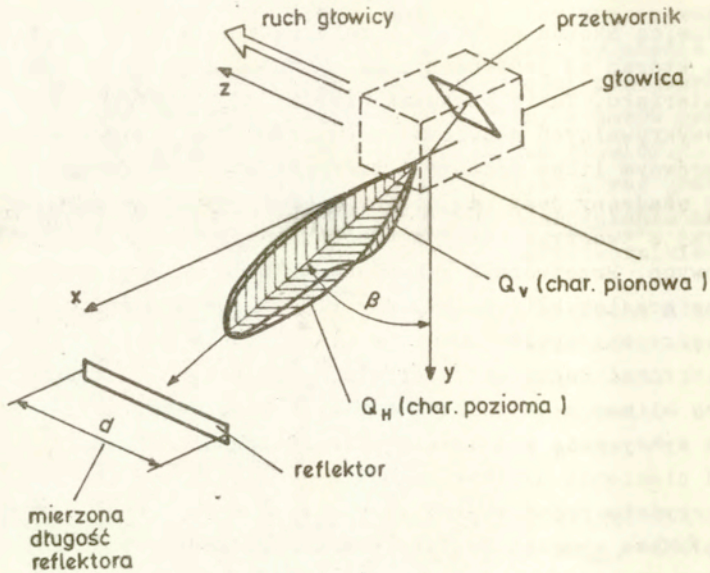
5. OCENA WIELKOŚCI WAD METODĄ PP PRZY WYKORZYSTANIU GŁOWIC SKOŚNYCH

Głowica skośna generuje w materiale wiązkę fal poprzecznych, której oś jest nachylona pod pewnym kątem do powierzchni materiału. Takie wprowadzanie fal umożliwia wykrycie wad niewykrywalnych głowicami normalnymi /np. wad leżących pod nierównym licem spoiny/. Przetwornik piezoelektryczny głowicy osadzony jest na klinie załamującym, wykonanym zazwyczaj z tworzywa o małej prędkości propagacji fal ultradźwiękowych. Przetwornik generuje w klinie falę podłużną, która na granicy klin-badany materiał ulega transformacji na falę poprzeczną spolaryzowaną w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni badanego materiału. Sprężenie akustyczne pomiędzy klinem a materiałem zapewnia warstwa cieczy. Schemat wykrywania wad taką głowicą pokazano na rys.2. Rozkład ciśnienia akustycznego w wiązce fal poprzecznych, w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni badanego materiału /tzw. pionowa charakterystyka kierunkowości głowicy/ zależy nie tylko od kształtu i wielkości przetwornika oraz parametrów akustycznych badanego materiału ale i od kąta załamania głowicy, prędkości propagacji fal podłużnych w materiale klina oraz współczynnika tłumienia fal w klinie. Charakterystyka ta jest zazwyczaj niesymetryczna względem osi wiązki.

Istnieją dwa sposoby wykorzystania metody PP przy stosowaniu głowic skośnych. Pierwszy z nich to pomiar wielkości wad przy przesuwie głowicy w kierunku prostopadłym do płaszczyzny polaryzacji fal /np. pomiar długości wad spoin/. Kierunek przemieszczania głowicy jest w tym przypadku, podobnie jak w przypadku głowic normalnych, równoległy do mierzonego wymiaru reflektora a kąt padania fal na powierzchnię reflektora w płaszczyźnie polaryzacji nie zmienia się. Nie zmienia się również współczynnik odbicia fali poprzecznej od swobodnej powierzchni reflektora.

Schemat pierwszego sposobu wykorzystania głowicy skośnej i metody PP pokazano na rys.47. Pozioma charakterystyka kierunkowości głowicy skośnej, oznaczona na tym rysunku jako Q_H

jest symetryczna względem osi wiązki.



Rys.47. Schemat pomiaru długości wady głowicą skośną /kierunek przesuwu głowicy jest prostopadły do płaszczyzny polaryzacji fal/.

Pierwszy sposób badania głowicą skośną wykazuje szereg podobieństw z pomiarem wielkości wad głowicą normalną, choć inna jest zasada działania i rodzaj fal generowanych przez te głowice. Podobieństwami tymi są:

- symetria poziomej charakterystyki kierunkowości głowicy skośnej i charakterystyki głowicy normalnej,
- małe zmiany odległości głowica wada zachodzące podczas przesuwu głowicy
- stałość w przypadku głowicy skośnej i małe zmiany współczynnika odbicia fal na powierzchni wady w przypadku głowicy normalnej /przykładowo, dla stali, zgodnie ze wzorem (19) współczynnik odbicia fali podłużnej R_{ll} dla kątów padania $0 \div 10^\circ$ zmienia się w granicach $1 \div 0,88$ czyli tylko o 12%.

Fakty te umożliwiają wykorzystanie zależności opisanych w rozdziale 4.4 do przybliżonego opisu zależności długości przesuwu głowicy skośnej od odległości i wielkości reflektora przy ocenie długości wad głowicą skośną przemieszczaną w kierunku prostopadłym do płaszczyzny polaryzacji fal. Potwierdzeniem wniosku jest zgodność rezultatów obliczeń i pomiarów przedstawionych w rozdziale 4.4 pracy z wynikami pomiarów długości wad sztucznych spoin przedstawionymi na rys.12 w pracy [28] .

Drugi sposób wykorzystania metody PP przy stosowaniu głowic skośnych polega na pomiarze długości przesuwu głowicy podczas ruchu głowicy w kierunku równoległym do płaszczyzny polaryzacji fal. Przypadek ten pokazano schematycznie na rys.2 a uzyskane w ten sposób krzywe $H(A)$ wykorzystywane są do oceny wysokości wykrytych wad.

Podczas ruchu głowicy zmienia się nie tylko położenie reflektora względem osi wiązki fal ale również odległość pomiędzy reflektorem a głowicą. Kształt krzywej $H(A)$ zależy więc od pionowej charakterystyki kierunkowości głowicy, spadku ciśnienia akustycznego w wiązce ze wzrostem odległości oraz od charakterystyki wiązki fal odbitych od wady.

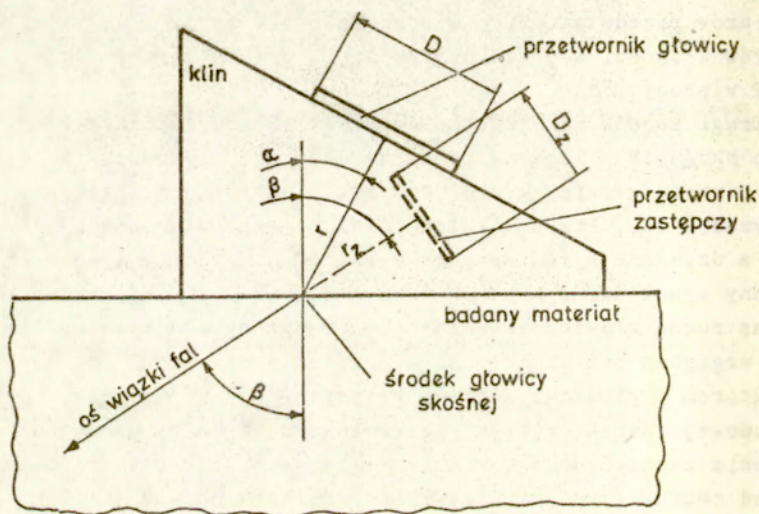
5.1 Numeryczne modelowanie zależności amplitudy echa od położenia głowicy

Do obliczania krzywych $H(A)$ dla reflektora wykrywanego głowicą skośną, przemieszczaną w kierunku równoległym do płaszczyzny polaryzacji fal, przyjęto model podobny do opisanego w rozdziale 4.2. Zakłada on punktowy model przetwornika generującego wiązkę fal, model reflektora podzielonego na szereg nieskończenie długich taśm oraz model przetwornika odbiorczego również podzielonego na szereg taśm.

W celu uproszczenia obliczeń geometrii fal odbitych od wady i powracających do elementów przetwornika, przyjęto model przetwornika zastępczego, opisanego w pracy [101] .

Przetwornik zastępczy głowicy skośnej ustawiony jest prosto-

padle do osi wiązki fal poprzecznych na klinie zastępczym wykonanym z tego samego materiału co badany ośrodek i sztywno z nim połączonym. Schemat głowicy z przetwornikiem zastępczym pokazano na rys.48.



Rys.48. Schemat głowicy skośnej z przetwornikiem zastępczym.

Rzeczywisty przetwornik głowicy skośnej ma kształt kwadratu o boku D , przetwornik zastępczy ma kształt prostokąta o bokach D_z /wymiar w płaszczyźnie rysunku/ i D /wymiar w płaszczyźnie prostopadłej do rysunku/. Wielkość D_z opisana jest wzorem

$$(29) \quad D_z = D / K(\beta)$$

$$\text{gdzie: } K(\beta) = \frac{\sqrt{1 - (c_L^k / c_T)^2 \cdot \sin^2 \beta}}{\cos \beta}$$

β - kąt załamania wiązki.

Odległość pomiędzy przetwornikiem zastępczym a środkiem głowicy pokazanym na rys.48 opisana jest zależnością

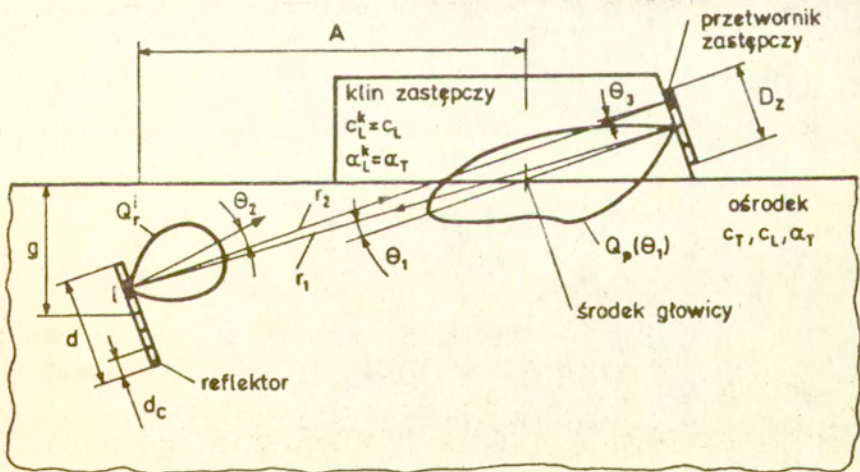
$$(30) \quad r_z = r \cdot c_L^k / c_T$$

gdzie c_L^k – prędkość propagacji fal podłużnych w klinie załamującym

c_T – prędkość propagacji fal poprzecznych w badanym ośrodku

r – odległość pomiędzy przetwornikiem a środkiem głowicy.

Przyjęte w modelu obliczeniowym punktowy przetwornik nadawczy i przetwornik odbiorczy pokrywają się z położeniem przetwornika zastępczego głowicy. Schemat obliczania amplitudy echa płaskiego reflektora ustawionego prostopadłe do osi wiązki fal poprzecznych, na głębokości g w ośrodku nieograniczonym przedstawia rys.49.



Rys.49. Schemat obliczania amplitudy echa płaskiego, ustawionego prostopadłe do osi wiązki fal reflektora.

Zgodnie z przyjętym modelem ciśnienie akustyczne fali padającej na element reflektora /podobnie jak we wzorze (13) / wynosi

$$(31) \quad P_1 = Q_v(\theta_1) \cdot P_p(r_1) \cdot e^{-\alpha r r_1}$$

gdzie $Q_v(\theta_1)$ jest pionową charakterystyką kierunkowości głowicy uzyskaną doświadczalnie, zgodnie ze schematem badania opisanym w rozdziale 5.2. Wyrażenie $P_p(r_1)$ opisuje zmiany ciśnienia fali wzdłuż osi wiązki i dane jest jako

$$(32) \quad P_p(r_1) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{R_0}{r_1}\right)$$

$$\text{gdzie } R_0 = \frac{1}{\pi \lambda} (D^2 + D_z^2) (0,78 - 0,27 D_z / D)$$

opisuje w przybliżeniu długość pola bliskiego głowicy skośnej [101] .

Człon $e^{-\alpha r r_1}$ we wzorze (31) odpowiada zmianom ciśnienia wywołanym tłumieniem fal poprzecznych w ośrodku.

Wartość napięcia sygnału elektrycznego powstającego na okładkach elementu przetwornika odbiorczego wynosi

$$(33) \quad V_E = P_i \cdot Q_r(\theta_2) \cdot P_r(r_2) \cdot R_r(\theta_1) \cdot \cos \theta_3 \cdot e^{-\alpha r r_2}$$

gdzie $Q_r(\theta_2)$ jest charakterystyką kierunkowości wiązki fal odbitych od elementu reflektora i wynosi

$$(34) \quad Q_r(\theta_2) = \cos \theta_1 \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_E \cdot \sin \theta_2\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_E \cdot \sin \theta_2}$$

Wyrażenie $P_r(r_2)$ opisuje zmiany ciśnienia fali odbitej od elementu reflektora wzdłuż osi wiązki odbitej i wynosi [102]

$$(35) \quad P_r(r_2) = \frac{d_E \cdot \cos \beta}{\cos \alpha \cdot \sqrt{r_2^3}}$$

$R_r(\theta_1)$ jest ciśnieniowym współczynnikiem odbicia fali poprzecznej na elemencie reflektora i opisuje go wyrażenie [103]

$$(36) \quad R_r(\theta_1) = \frac{(c_T/c_L)^2 \cdot \sin 2\theta_L \cdot \sin 2\theta_1 - \cos^2 \theta_1}{(c_T/c_L)^2 \cdot \sin 2\theta_L \cdot \sin 2\theta_1 + \cos^2 \theta_1}$$

$$\text{gdzie } \theta_L = \arcsin(c_L/c_T \cdot \sin \theta_1)$$

Dla kątów padania $\theta_1 > \arcsin(c_T/c_L)$ współczynnik odbicia $R_r(\theta_1) = 1$, pojawia się natomiast przesunięcie fazowe $\Delta\psi$ impulsu odbitego od elementu wady wynoszące [37]

$$(37) \quad \Delta\psi = 2 \arctan \frac{4 \cdot \sin^2 \theta_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1} \cdot \sqrt{\sin^2 \theta_1 - (c_T/c_L)^2}}{(1 - 2 \sin^2 \theta_1)^2}$$

Całkowita wartość napięcia sygnału elektrycznego powstającego na okładkach przetwornika jest sumą napięć sygnałów po wszystkich elementach przetwornika

$$(38) \quad V = \sum_m \sum_n V_E$$

a czas przejścia impulsu T_E oraz amplituda echa H , podobnie jak w modelowaniu badania głowicą normalną, wynoszą

$$(39) \quad T_E = (r_1 + r_2) / c_T$$

$$(40) \quad H = V_{\max}(t)_{T_E^c \max > t > T_E \min}$$

$$\text{gdzie } T_E^c \max \text{ opisuje wzór (25) .}$$

Amplitudę echa wady wykrywanej głowicą skośną z przetwornikiem zastępczym wyrazić więc można podobnie jak dla głowicy normalnej wzorem (26), a mierzony czas przejścia impulsu – wzorem (27) .

Przyjęty w obliczeniach model przetwornika zastępczego nie uwzględnia zmian współczynnika przenikania na granicy badany materiał – klin załamujący impulsów powracających do przetwornika i ich wpływu na ciśnienia akustyczne tych

impulsów. Zakłada się również, że współczynnik tłumienia fal w badanym materiale i materiale klina zastępczego jest taki sam, czyli pomija się wpływ tłumienia fal w klinie rzeczywistej głowicy.

Dla kątów padania fali poprzecznej na granicę badany materiał - klin, obejmujących zakresy charakterystyk kierunkowości stosowanych głowic, współczynnik przenikania fal przez tę granicę zmienia się nieznacznie. Przykładowo dla granicy stal-polimetakrylan metylu i kątów padania fali poprzecznej od 35° do 55° , współczynnik ten wynosi odpowiednio od 0,22 do 0,185, czyli zmienia się w granicach $\pm 9\%$ od wartości średniej [99].

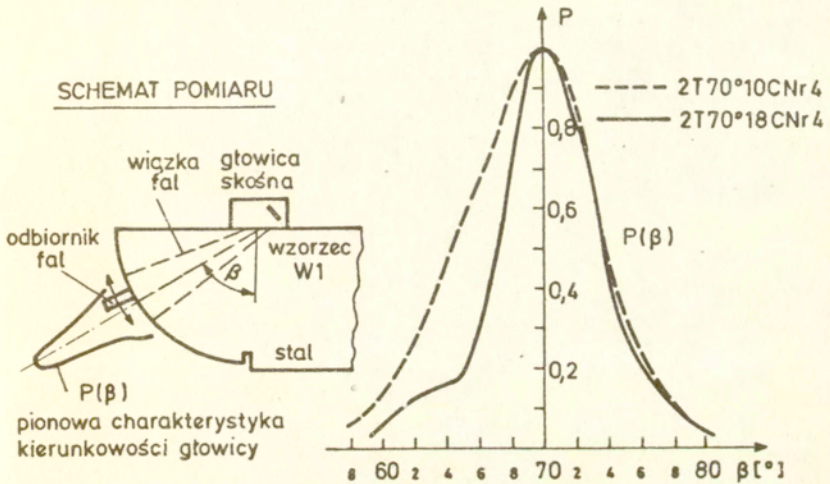
Wpływ innego współczynnika tłumienia w materiale klina załamującego niż w badanym materiale na ciśnienia akustyczne impulsów elementarnych, ze względu na małe różnice dróg impulsów w klinie, można pominąć.

5.2 Badania doświadczalne

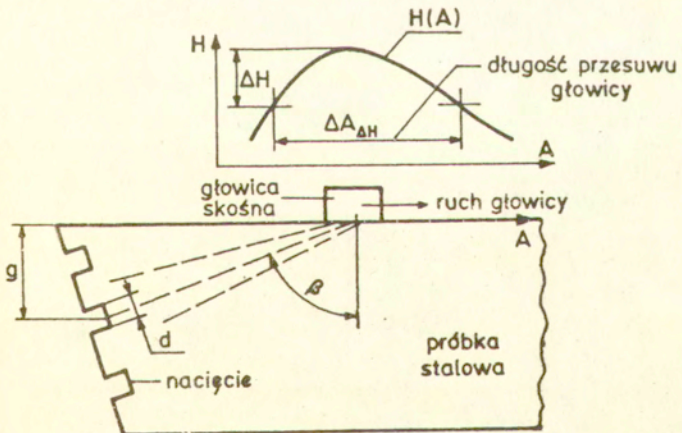
Badania przeprowadzono głowicami skośnymi o kątach załamania osi wiązki $\beta = 45^\circ$ i 70° , częstotliwościach $f = 2$ i 4 MHz wyposażonymi w kwadratowe przetworniki piezoelektryczne o bokach $D = 7, 10$ i 18 mm. Pionowe charakterystyki kierunkowości stosowanych głowic zmierzone zostały na stalowej próbce /wzorcze W1/, zgodnie ze schematem pokatany na rys.50. Jako odbiornik fal generowanych przez głowicę skośną wykorzystana była miniaturowa głowica normalna na fale poprzeczne a sprzężenie akustyczne zapewniała gęsta ciecz /Epidian 5/. Charakterystyki głowic mierzone były w odległości 100 mm od środków głowic.

Pomiary długości przesuwu głowic przeprowadzono na stalowych próbkach z płaskimi nacięciami /wadami sztucznymi/ usytuowanymi prostopadle do osi wiązki fal. Nacięcia położone były na różnych głębokościach g i posiadały różne wymiary d . Jako ośrodek sprzęgającego używano oleju maszynowego.

Schemat pomiarów długości przesuwu przedstawia rys.51.



Rys.50. Schemat pomiaru pionowej charakterystyki kierunkowości głowicy skośnej.



Rys.51. Schemat pomiarów długości przesuwu głowicy skośnej na wadach sztucznych.

5.3 Wyniki badania zależności amplituda-położenie głowicy dla wad w ośrodku nieograniczonym

W odróżnieniu od opisanego w rozdziale 4 przypadku stosowania głowic normalnych, długości przesuwu zmierzone głowicą skośną silnie zależą od kąta załamania głowicy a ze względu na zmiany odległości pomiędzy reflektorem a przetwornikiem zachodzące podczas przesuwu głowicy, krzywe $H(A)$ nie są symetryczne.

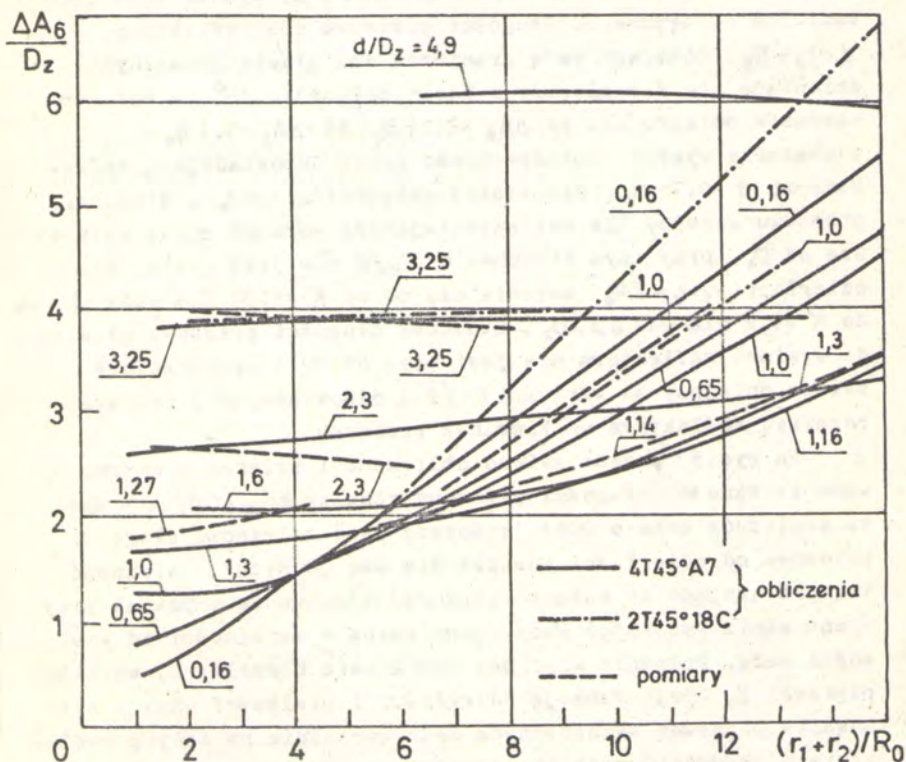
Przedstawione w dalszej części pracy wyniki obliczeń uzyskane zostały dla ośrodka odpowiadającego parametrami akustycznymi stali konstrukcyjnej i głowic ultradźwiękowych typu 2T45°A7 / $D=7$ mm, $f=1,95$ MHz, $\beta=45^\circ$ / i typu 2T70°10C / $D=10$ mm, $f=2,09$ MHz, $\beta=70^\circ$ /.

Porównywane z wynikami obliczeń rezultaty pomiarów doświadczalnych uzyskane są jako wartości średnie z wyników badań przeprowadzonych wieloma głowicami skośnymi, różniącymi się wielkościami przetworników, częstotliwościami i rozbieżnościami generowanych przez nie wiązek. W badaniach wykonano w sumie 14 głowic skośnych różnych typów.

5.3.1 Długości przesuwu głowicy o kącie załamania równym 45°

Na rys.52 pokazano zmierzone /linie przerywane/ i obliczone /linie ciągłe/ unormowane zależności długości przesuwu głowicy ΔA_6 przy spadku amplitudy echa o $\Delta H=6$ dB od odległości i wielkości reflektora. Długości przesuwu odniesione są do wielkości D_z przetwornika zastępczego głowicy /opisanego wzorem (28) / a odległości — do długości pola bliskiego głowicy R_0 /opisanego wzorem (32) / . Odległość pomiędzy przetwornikiem a reflektorem r_1+r_z odpowiada odległości pomiędzy środkami przetwornika zastępczego i reflektora dla położenia głowicy, przy którym oś wiązki fal generowanych przez głowicę trafia w środek reflektora. Takie położenie głowicy, dla małych reflektorów, odpowiada położeniu, w którym uzyskuje się maksymalną amplitudę echa. Odległość r_1+r_z , dla

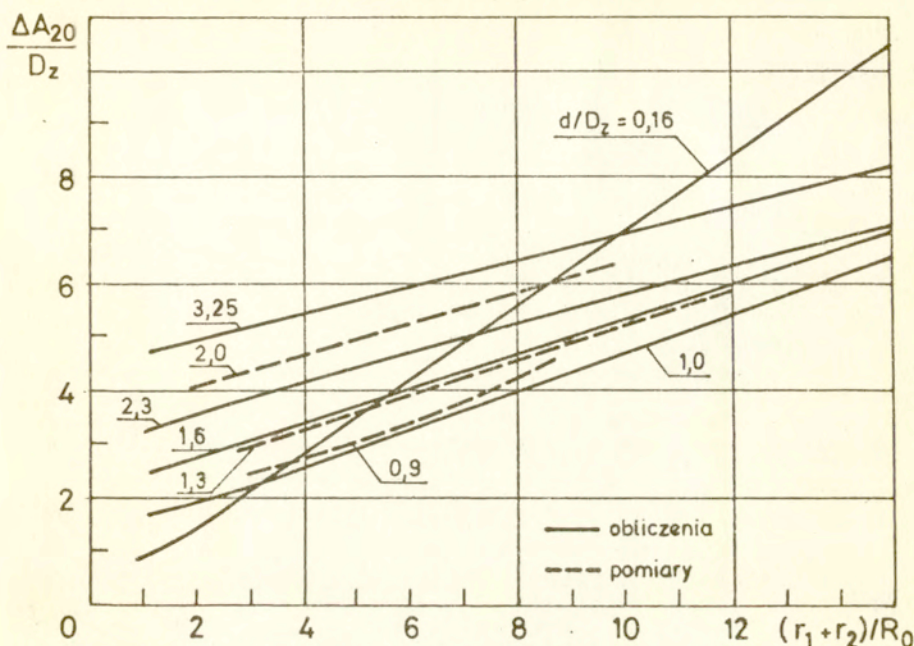
danej głowicy, jest w przybliżeniu proporcjonalna do głębokości g na jakiej usytuowana jest pod powierzchnią materiału wada. Na rys.52 dodatkowo, linią kropkowaną, naniesiono unormowane zależności $\Delta A_6(r,d)$ obliczone dla głowicy typu 4T45A7, dla wad o rozmiarach $d=0,16 D_z$, $d=D_z$ i $d=3,25 D_z$. Różnice pomiędzy wynikami obliczeń uzyskanymi dla dwóch różnych głowic obrazują wpływ charakterystyki kierunkowości poszczególnych głowic na unormowane długości przesuwu, widoczny szczególnie wyraźnie dla małych reflektorów.



Rys.52. Unormowane zależności przesuwu głowicy od odległości i wielkości reflektora przy spadku amplitudy echa o 6dB dla głowic skośnych o kącie załamania $\beta = 45^\circ$.

Podobnie jak dla głowic normalnych /rys. 18 i 19/ widoczna jest silna zależność długości przesuwu głowicy od odległości dla wad „małych” i praktycznie brak tej zależności dla wad odpowiednio „dużych”. Pole wykresu można też podzielić na cztery, opisane w poprzednich rozdziałach, charakterystyczne obszary. Inne są natomiast relacje długości przesuwu głowicy i wielkości reflektorów oraz inna jest graniczna wielkość wady, dla której długość przesuwu nie zależy od odległości. Brak tej zależności praktycznie obserwowany jest dla wad o wymiarach większych niż 3-krotny wymiar boku przetwornika zastępczego. Długości przesuwu dla reflektora $d = 1,6 D_z$, będącego wadą graniczną dla głowic normalnych, zmieniają się dla głowicy o kącie załamania 45° , w badanym zakresie odległości, od $\Delta A_6 = 2,15 D_z$ do $\Delta A_6 = 3,4 D_z$. W obszarze wykresu leżącym ponad linią odpowiadającą reflektorowi $d = 0,16 D_z$, dla stałej odległości $r_1 + r_x$, długości przesuwu głowicy dla wad spełniających warunek $d \geq D_z$ są większe od D_z , przy czym stosunek $K = \Delta A_6 / d$ nie jest stały. Dla odległości $r_1 + r_2 = 2R_0$ zmienia się on od $K = 1,32$ dla wady $d = D_z$ do $K = 1,2$ dla wad $d \geq 2D_z$. Stosunek długości przesuwu głowicy do wymiaru reflektora nie jest więc stały a jednocześnie zawsze mniejszy od wartości $K = \sqrt{2}$, odpowiadającej rzutowi rozmiaru reflektora na kierunek przesuwu.

Na rys. 53 przedstawiono obliczone i zmierzone unormowane zależności długości przesuwu głowicy $\Delta A_{20}(r, d)$ dla spadku amplitudy echa o 20dB. Widoczna jest zależność długości przesuwu od odległości również dla wad „dużych”. Zależność ta, pociągająca za sobą konieczność stosowania poprawek przy wyznaczaniu wysokości wady, jest różna w zależności od wielkości wady. Podobnie więc jak dla głowic normalnych, wartość poprawki b_s jest funkcją odległości i wielkości wady a stosowanie poprawek wyznaczonych doświadczalnie na małych reflektorach prowadzić może do niebezpiecznego zaniżania wielkości ocenianej wady. Jako minimalną wielkość płaskiej, ustawionej prostopadle do osi wiązki fal wady wzorcowej stosowanej do wyznaczania poprawki b_s , przyjmując można $d = 2D_z$.

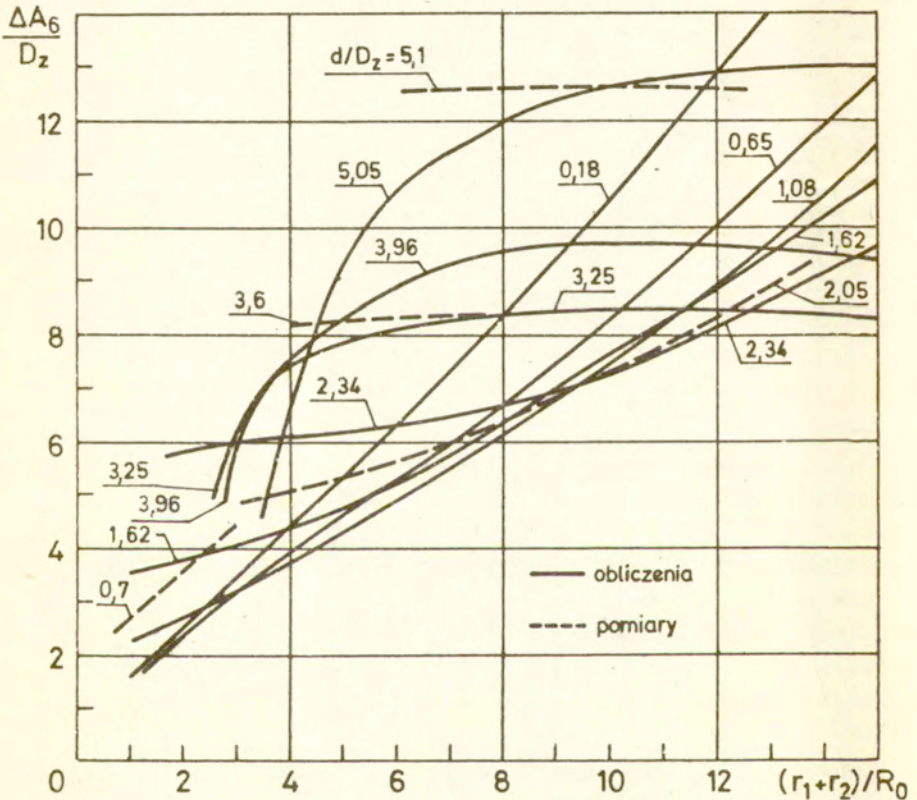


Rys.53. Unormowane zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości wady dla głowic skośnych o kącie załamania 45° , przy spadku amplitudy o 20dB.

5.3.2 Długości przesuwu głowicy o kącie załamania równym 70°

W odróżnieniu od głowic normalnych czy skośnych o kącie załamania równym 45° , w przypadku głowic o kącie załamania równym 70° , przesuw głowicy odbywa się w kierunku tworzącym z osią wiązki fal kąt równy jedynie 20° . Umożliwia to z jednej strony penetrowanie obszarów materiału niedostępnych w inny sposób, z drugiej jednak strony powoduje znaczne wydłużenie mierzonego przesuwu głowicy. Odległość pomiędzy przetwornikiem a reflektorem zmienia się wyraźnie podczas przemieszczania głowicy, tym bardziej im większy jest wymiar reflektora. Prowadzi to do sytuacji, w której przebieg krzywej $H(A)$ w zauważalnym stopniu zależy nie tylko od kątowych rozkładów ciśnienia akustycznego w wiązkach fal wysyłanych przez głowicę i odbitych od wady ale również od

spadku ciśnienia akustycznego wzdłuż osi wiązek tych fal. Z kolei wspomniany spadek ciśnienia zależy jest od rozbieżności wiązek fal i od tłumienia fal w ośrodku. W rezultacie długości przesuwu głowic dla „dużych” reflektorów leżących na małych głębokościach, przy małych spadkach amplitudy echa, są mniejsze niż długości przesuwu dla wad nieco mniejszych. Widoczne jest to na rys.54 przedstawiającym unormowane zależności długości przesuwu głowic o kącie załamania $\beta = 70^\circ$, dla spadku amplitudy echa o $\Delta H = 6\text{dB}$.

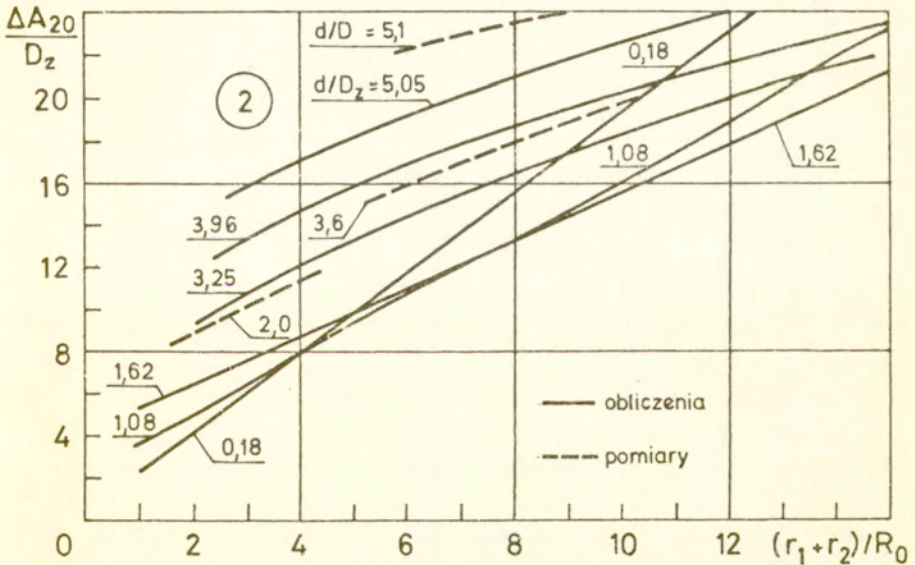


Rys.54. Unormowane zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości wady dla głowicy skośnej o kącie załamania 70° , przy spadku amplitudy echa o 6dB .

Obszar, w którym długości przesuwu są proporcjonalne do wymiaru reflektora /analogiczny do obszaru ② dla głowic normalnych/ ograniczony jest więc dodatkowo minimalną odległością. Dla wad spełniających warunek $d > 5D_z$ odległość ta wynosi w przybliżeniu $r_1 + r_2 \approx 4,5 R_0$.

Stosunek długości przesuwu głowicy do rozmiaru wad „dużych”, dla stałej odległości, nie jest stały. Przykładowo dla $r_1 + r_2 = 8R_0$ zmienia się on od $K = 2,9$ dla wady $d = 2,34 D_z$ do $K = 2,37$ dla wady o wielkości $d = 5,05 D_z$. Podobnie więc jak dla głowic o kącie załamania równym 45° jest on mniejszy niż stosunek wynikający z rzutu wymiaru reflektora na kierunku przesuwu głowicy, wynoszący $K = 1/\sin 20^\circ = 2,92$.

Na rys.55 pokazano obliczone i zmierzone zależności długości przesuwu głowicy dla spadku amplitudy echa o 20dB. Przy tym spadku amplitudy zachowana jest proporcjonalna za-



Rys.55. Unormowane zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości wady dla głowicy skośnej o kącie załamania 70° , przy spadku amplitudy echa o 20dB.

leżność długości przesuwu dla reflektorów „dużych” od ich rozmiaru i metoda PP_{20dB} , z uwzględnieniem poprawek, stosowana może być do oceny wielkości wad mieszczących się w obszarze (\odot) , leżącym ponad linią odpowiadającą „małej” wadzie $d=0,18 D_z$.

Obliczenia krzywych $H(A)$ i długości przesuwu głowicy przeprowadzone zostały dla ośrodka o stosunkowo niskim współczynniku tłumienia fal ultradźwiękowych /stal konstrukcyjna/. Dla materiałów o wyższej wartości współczynnika tłumienia /lub przy stosowaniu głowic o wyższych częstotliwościach/ zależność długości przesuwu głowicy od zmian odległości przetwornik-wada powstających podczas przemieszczania głowicy, wywołana tłumieniem fal, będzie wyraźniejsza.

Należy zaznaczyć, że spadek ciśnienia akustycznego wzdłuż osi wiązki fal odbitych od reflektora zależy jest od długości tego reflektora /wymiaru w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rys.49/. Opisane w pracy zależności dotyczą przypadku reflektora o długości większej niż szerokość wiązki fal generowanych przez głowicę, w odległości w jakiej usytuowana jest wada /czyli tzw. wad liniowych lub rozległych/.

5.4 Wnioski dotyczące głowic skośnych

1. Przedstawione na rys.52 i 55 obliczone zależności długości przesuwu głowicy od odległości i rozmiaru wady, uzyskane są dla dwóch typowych, stosowanych w badaniach niszczących głowic skośnych o kątach załamania wiązki 45° i 70° . Porównane z wynikami obliczeń rezultaty pomiarów doświadczalnych są średnimi wartościami zmierzonymi różnego typu głowicami skośnymi. Prezentowane wyniki obrazują więc ogólne kierunki zmian długości przesuwu a nie zależności prawdziwe dla wszystkich typów głowic skośnych. Przedstawione zmiany długości przesuwu będą też zależne od tłumienia fal w badanym materiale i od prędkości propagacji fal poprzecznych, od której zależy jest rzeczywisty kąt

załamania głowicy.

2. Pole wykresu $\Delta A_G(r,d)$ dla głowic o kącie załamania wiązki równym 45° , podobnie jak w przypadku głowic normalnych, podzielić można na 4 charakterystyczne obszary, przy czym wielkość wady granicznej jest inna i wynosi $d_{gr} = 3D_z$. Stosunek długości przesuwu ΔA_G do wymiaru reflektora d , dla wad większych niż wielkość graniczna, nie jest stały i zależy od wielkości wady. Ocena rozmiarów wad „dużych” metodą PP_{6dB} z przyjęciem, że $d = \Delta A_G / \sqrt{2}$ jak proponowane jest w szeregu prac, prowadzi do błędnej oceny wielkości wady.

3. Zależności $\Delta A_G(r,d)$ dla głowic o kącie załamania równym 70° przebiegają inaczej i obserwowana jest odwrotna zależność długości przesuwu głowicy od wielkości reflektora dla wad „dużych”, leżących w małych odległościach od głowicy /czyli na małych głębokościach/. Na wykresie obrazującym te zależności wyróżnić można jedynie mały obszar, w którym długości przesuwu głowicy są proporcjonalne do rozmiarów reflektorów „dużych” i jednocześnie są większe niż długości przesuwu dla reflektorów „małych”.

Dla głowic skośnych, niezależnie od kąta załamania, czas przejścia impulsu rośnie monotonicznie ze wzrostem współrzędnej A określającej położenie głowicy na powierzchni materiału. Uniemożliwia to wykorzystanie zmian czasu przejścia impulsu do rozróżniania wad „dużych” od „małych”.

Metoda PP_{6dB} w przypadku stosowania głowic skośnych o kącie załamania 70° wykorzystana może być w praktyce jedynie do oceny wielkości wad leżących w ograniczonym zakresie odległości i wad o ograniczonej wielkości, z koniecznością stosowania poprawek.

4. Zależności długości przesuwu głowicy od odległości i wielkości reflektora, przy spadku amplitudy echa o $20dB$, zarówno dla głowic o kącie załamania 45° jak i 70° , umożliwiają wykorzystanie metody PP_{20dB} do oceny wielkości wad z uwzględnieniem poprawek. Poprawki te, dla głowic normalnych zwane poprawkami na skuteczną szerokość wiązki, w przy-

padku głowic skośnych uwzględniają oprócz rozbieżności wiązki spadek ciśnienia akustycznego wzdłuż osi wiązki oraz tłumienie fal ultradźwiękowych w badanym materiale.

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zależności długości przesuwu głowicy od odległości pomiędzy przetwornikiem a reflektorem i od rozmiaru płaskiego reflektora. Pierwsza, główna część pracy dotyczy głowic normalnych, w drugiej opisane są wyniki uzyskane głowicami skośnymi.

Dla głowic normalnych istnieje ogólna zależność długości przesuwu głowicy ΔA od szeregu parametrów

$$\Delta A = \Delta A(D, f, c, z, d, \Delta H)$$

gdzie D, f - parametry przetwornika
 c - prędkość propagacji fal
 z, d - głębokość zalegania i rozmiar wady
 ΔH - spadek amplitudy echa.

W pewnych warunkach długość przesuwu głowicy jest równa wymiarowi wady

$$\Delta A = d$$

a równość ta zachodzi gdy

$$K \cdot D^2 / (4 \cdot \lambda) \leq z < 15 \cdot K \cdot D^2 / (4 \cdot \lambda)$$

$$\Delta H = 6 \text{ dB}$$

$$d \geq 1,6 D$$

gdzie K - czynnik zależny od kształtu przetwornika.

W pozostałych przypadkach, gdy $\Delta H > 6 \text{ dB}$, przesuw głowicy $\Delta A > d$ a wartość poprawki b_s równej $b_s = \Delta A - d$, jest funkcją

$$b_s = b_s(\Delta H, D, f, c, z, d)$$

Zależności $\Delta A(d, z)$ dla głowic normalnych, generujących rozbieżne wiązki fal podłużnych, przedstawione graficznie na rys. 19, 26 i 27, traktować można jak zależności uniwersalne. Przez analogię do znanych i powszechnie stosowanych

wykresów OWR, obrazujących zależności amplitudy echa wady od odległości i wielkości wady, rysunki te nazwać można uniwersalnymi wykresami PP. Są one z praktycznego punktu widzenia prawdziwe dla wszystkich typów stosowanych w defektoskopii ultradźwiękowej głowic pojedynczych /wyposażonych w jeden płaski przetwornik piezoelektryczny/. Wynika to z faktu, że rzeczywiste charakterystyki kierunkowości tych głowic są zbliżone do obliczeniowych rozkładów ciśnienia akustycznego pól tłokowo drgających membran o wymiarach i kształtach przetworników.

W przyjętym w pracy zakresie odległości, dla spadku amplitudy echa o 6dB, istnieje graniczna wielkość reflektora, powyżej której długość przesuwu głowicy nie zależy od odległości i jest równa rozmiarowi reflektora. Jest ona znacznie mniejsza niż szerokość wiązki fal generowanych przez przetwornik w danej odległości, jednakże wyraźnie większa od wymiaru przetwornika i wynosi $d_{gr} = 1,6D$. Wady równe lub większe niż wada graniczna mogą być metodą PP_{6dB} oceniane bez potrzeby stosowania poprawek, w całym zakresie odległości.

Istnieje też, wykorzystując informacje dostępne przy użyciu standardowej aparatury, możliwość rozróżniania wad większych niż graniczna od wad „małych”, dla których długości przesuwu głowicy są równie duże lub większe. Rozróżnianie to prowadzić można w oparciu o pomiar zmian czasu przejścia impulsu. Innym sposobem rozróżniania może być wykorzystanie metody OWR /choć nie jest ona przeznaczona do oceny wielkości wad „dużych“/.

Określony zakres przesuwów głowicy, zależny od odległości, związany jest z „dużymi”, niepłaskimi lub nierównoległymi do kierunku przemieszczania głowicy reflektorami. Stosowanie metody PP w tym zakresie prowadzi do niebezpiecznego niedoceniań wielkości wady.

Z rezultatów uzyskanych dla większych niż 6dB spadków amplitudy echa wynika wyraźna zależność poprawki b_5 nie tylko od parametrów głowicy, ośrodka oraz odległości ale również od rozmiaru ocenianej wady, czyli wielkości nieznannej w czasie pomiaru. Stosowanie poprawek wyznaczonych w oparciu

jedynie o charakterystykę kierunkowości wiązki fal generowanych przez głowicę, przy ocenie wielkości rozległych, płaskich wad, prowadzić może do niebezpiecznego zaniżania wyznaczanych rozmiarów tych wad. Najprostszym praktycznym rozwiązaniem problemu poprawek jest wyznaczanie ich wartości na odpowiednio dużych wadach wzorcowych /co zabezpieczy przed zaniżaniem wielkości wad/. Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie wykresów PP, na których długości przesuwów głowic są większe od wymiarów odpowiadających im wad o rzeczywiste, zależne od odległości, głowicy i wielkości reflektora wartości poprawek.

Możliwość unormowania zależności $\Delta A(z,d)$ dla głowic normalnych o różnych wielkościach przetworników i częstotliwościach, pozwalają na uzyskanie z ich pomocą większej ilości informacji o wykrytych wadach, przy użyciu jednej głowicy wyposażonej w przetwornik prostokątny lub mogący generować fale o różnych częstotliwościach. Zastosowanie takich głowic pozwala na rozróżnianie wad „dużych” od „małych” bez potrzeby pomiaru zmian czasu przejścia impulsu. Koncepcję wykorzystania omawianych głowic i wykresów PP do oceny wielkości i rodzaju wad przedstawiono w załączniku 2.

Inaczej niż dla reflektorów w ośrodku nieograniczonym przedstawiają się zależności $\Delta A(z,d)$ dla wad rozpoczynających się od bocznej ściany materiału. Zmiany kształtu krzywych $H(A)$ a co za tym idzie i długości przesuwu głowicy wywołane obecnością rozległego, płaskiego reflektora jakim jest boczna ściana, prowadzić mogą do błędnej lokalizacji i oceny wielkości tak usytuowanych wad metodą PP. Przebiegi krzywych $H(A)$ dla wad tworzących z boczną ścianą naroże zależą również od kształtu impulsu ultradźwiękowego generowanego przez głowicę, co praktycznie nie ma miejsca w przypadku płaskich wad leżących w ośrodku nieograniczonym.

Inna zasada działania i konstrukcja głowic skośnych /zastosowanie klina załamującego, transformacja fal/ powodują, że pionowe charakterystyki kierunkowości tych głowic zależą nie tylko od wielkości przetwornika, częstotliwości

i kąta załamania ale również od budowy głowicy.

Przedstawione w drugiej części pracy zależności długości przesuwu głowicy skośnej od wielkości i położenia wady nie mogą więc być traktowane jako uniwersalne wykresy PP.

Pokazują one jednak kierunki zmian jakie zachodzą w długościach przesuwu dla różnych reflektorów i odległości.

Istnieje natomiast możliwość zbudowania wykresu PP dla konkretnego typu głowicy lub grupy głowic skośnych generujących w materiale zbliżone do siebie pola akustyczne.

Dla głowic o kącie załamania równym 45° omawiane zależności są jakościowo podobne do zależności dla głowic normalnych, choć długości przesuwu głowic są większe ze względu na nieprostotałość kierunku przesuwu głowicy i osi wiązki fal. Długości te są jednak krótsze niż wynikałoby to z bezpośredniego wykorzystania zależności dla głowic normalnych z uwzględnieniem rzutu wielkości wady na kierunek przesuwu głowicy /a więc wyznaczania wielkości wady jako podzielonej przez $\sqrt{2}$ długości przesuwu głowicy/. Stosowanie takiej praktyki, szczególnie dla wad dużych, prowadzi do zaniżania wyznaczonej wielkości wady.

W przypadku stosowania głowic skośnych o kącie załamania równym 70° , wyraźny wpływ na długości przesuwów głowicy odgrywa spadek ciśnienia akustycznego wiązek fal generowanych przez przetwornik i odbitych od wady, wywołany wzrostem odległości pomiędzy przetwornikiem a reflektorem podczas przesuwu głowicy. Uzyskane zależności $\Delta A(r,d)$ są inne niż w przypadku głowic normalnych czy skośnych o małym kącie załamania. Obszar, w którym długości przesuwu przy spadku amplitudy echa o 6dB są proporcjonalne do wymiarów reflektorów, jest dodatkowo ograniczony albo maksymalną wielkością wady albo minimalną odległością. Ograniczenia te nie występują jednak dla spadku amplitudy echa o 20dB, przy którym metoda PP może być stosowana z uwzględnieniem poprawek w całym zakresie odległości.

Zarówno dla głowic normalnych jak i skośnych o kącie załamania 45° zaobserwować można odległości, w których wadom o różnych wielkościach odpowiadają zbliżone długości

przesuwów głowicy. Dla spadku amplitudy echa o 6dB odległość taka wynosi $3+5N$, a dla spadku o 20dB – około $7N$. Są to odległości niekorzystna z punktu widzenia dokładności pomiaru wielkości małych wad metodą PP. W praktyce sytuacji takich unikać można odpowiednio dobierając głowice do odległości pomiędzy pomierzchnią materiału a ocenianą wadą.

WYKAZ LITERATURY

- [1] Deputat J., Mazurek J., Pawłowski Z.
Ultradźwiękowa metoda oceny wad w grubych złączach spawanych.
Prace IPPT 22/1970
- [2] Wüstenberg H., Mundry E.
Beitrag zur Halbwertstiefenausdehnung von Reflexionsstellen in der Materialprüfung mit Ultraschall.
Materialprüfung vol.13, No10, pp.329, 1971
- [3] Gurvič A.K., Ščukin V.A.
Spravnitel'naja ocenka sposobov izmierenija uslovnoj protiažennosti defektov.
Defektoskopija No6, str.65, 1970
- [4] Schlengermann U.
Problems regarding sound field structure when testing materials with ultrasound.
Mat.7WCNDT Warsaw 1973, tom2, str.409
- [5] Jočev B.
Ultradźwiękowa metoda oceny rozmiarów wad makrostruktury ośrodków izotropowych i anizotropowych.
Praca doktorska, IPPT PAN, 1974
- [6] Pawłowski Z.
Badania nieniszczące.
Skrypt ODK SIMP Warszawa 1975, str.121
- [7] Silk H.G., Lidington B.H.
A preliminary study of the effect of defect shape and roughness on the ultrasonic size estimation.
Non destructive testing vol.8, No1, pp.27, 1975
- [8] Schlengermann U., Frielinghaus R.
Remarks on practice of determining the size of reflectors by scanning.
The Brit.J.of NDT vol.20, No1, pp.9, 1978
- [9] Dymkin G.J., Comuk S.R.
Issledovanie slučajnych pogrešnosti izmierenija uslovných razmierov defektov.
Defektoskopija No8, str.78, 1981
- [10] Čegorinskij W.A.
Issledovanie uslovnoj širiny defektov pri ultrazvukovom kontrolije svarných švov.
Defektoskopija No5, str.63, 1979

- [11] Wüstenberg H., Kutzner J., Kaps U.
Flaw size determination in ultrasonic inspection by evaluation of echodynamic pattern.
Mat. 8WCNDT Cannes 1976, ref. 3H2 -
- [12] Nardoni G., Berzolla A.
Study of a method for size estimation of defect detected in heavy wall thickness welds with ultrasonic inspection by means of the amplitude displacement curve.
Mat. 8WCNDT Cannes 1976, ref. 3H10
- [13] Gurvič A.K., Kuzmina L.I.
Indykatory rozsejania kak istočnik dopolnitelnoj informacii o vyjavliennyh defektach.
Defektoskopiya, No6, str. 47, 1970
- [14] Čegorinskij W.A.
Issledovanie uslovnoj širiny defektov naklonnym iskatiel'm s regulirujemoj diagrammoj napravliennosti.
Defektoskopiya, No9, str. 67, 1979
- [15] Murphy R.V.
Toroidal, conical and spherical lenses in ultrasonic inspection.
Materials Evaluation, vol. 39, No3, pp. 391, 1981
- [] Burckhardt C.B., Hoffman H., Grandchamp P.A.
Ultrasonic axicon: a device for focussing over a large depth.
JASA, vol. 54, No6, pp. 1628, 1973
- [17] Weight J.P.
The propagation and reception of wide band ultrasonic pulses.
Doctor of philosophy thesis, The City University, London, 1982
- [18] Szelażek J.
Ultraźwiękowa głowica skupiająca z ogniskiem liniowym.
Mat. 9KKBN Frombork 1979, ref. K-9
- [19] Hosseini S., Harrold S.O., Reeves J.M.
Resolution studies on an electronically focused ultrasonic array.
The Brit. J. of NDT, vol. 27, No4, pp. 234, 1985
- [20] Hullin Ch., Barabian O.A., Haralamb G., Reader E.
Experiences with computer aided evaluation of ultrasonic test data in a heavy plate mill.
- [21] Hullin Ch., Barabian O.A., Haralamb G., Reader E.
Auswertung der Ergebnisse automatischer Ultraschallprüfungen und Bewertung von Grobblechen nach Lieferbedingungen mittels eines EDV-System.
Materialprüfung, vol. 25, No9, pp. 302, 1983

- [22] Meyer R., Prestel I., Heinrich W.
Accurate evaluation of flaw size in turbine rotors
by ultrasonic a modern technique to satisfy the
requirement of fracture mechanics.
Mat. 2 European Conf. on NDT Mainz 1978, pp.6/73
- [23] Szalązek J., Pawłowski Z.
Ultradźwiękowy atlas wad spoin.
Mat. 10KKBN Jadwisin 1980, ref.R-23
- [24] Szalązek J.
Wozmożnosti ocenki wieličiny i roda defektov v ručnom
ultrazvukovom kontroliie svarnych švov.
Defektoskopija, No5, str.86, 1986
- [25] Doc. IIW/IIS VF 141 83
- [26] Gaugblauer O., Wallner F., Ausserwager J., Rose J.L.,
Nestleroth J.B., Niklas L.
Fehlerklassifikation in Schweissverbindungen mit
Ultraschall unter Einbeziehung des Echodynamik-Verhal-
tens.
Mat. 3 European Conf. on NDT Florence 1984, pp.361
- [27] Obraz J.
Ultrazvukove provožu prohlidku teles tlakovych nadob
energetických jaderných reaktorů.
Jaderna Energie, vol.24, No1, pp.1, 1978
- [28] Deputat J.
Szerokość obwiedni ech reflektorów wzorcowych.
Prace IPPT 45/1980
- [29] Szalązek J.
Obszar skuteczny pola głowicy ultradźwiękowej.
Prace IPPT 17/1982
- [30] Szalązek J.
Szerokość skuteczna wiązki głowicy skośnej.
Mat. 10KKBN Opole 1982, ref.R 9
- [31] Serabian S.
Ultrasonic size determination of inclined flaws - use
of maximum flaw response.
The Brit. J. of NDT, vol.24, No11, pp.311, 1982
- [32] Serabian S.
Amplitude independent flaw characterization - use of
maximum amplitude location.
Mat. 12WCNDT Las Vegas 1985, pp.1072
- [33] Serabian S., O'Callahan J.C.
Pulsed ultrasonic flaw detection model.
Materials Evaluation, vol.43, No6, pp.873, 1985

- [34] Walte F., Warneyer R., Horst B.
Zur Bestimmung von Prüfzonen bei der Ultraschallprüfung nach dem Tandemverfahren.
Materialprüfung, vol. 19, No 5, pp. 174, 1977
- [35] Ščerbinskij W.G., Bielyj W.B.
Obnaruženie defektov svarnych švov pri ultrazvukovom kontrolije systemom tandem.
Defektoskopija, No 4, str. 23, 1973
- [36] Werneyer R., Schlengermann U.
Über die Reflexion von Ultraschallwellen an Oberflächenrissen und nutzförmigen Testfehlern - Folgerungen für die Praxis.
Materialprüfung, vol. 13, No 9, pp. 298, 1971
- [37] Ammirato F.V.
A calculational model for the shear wave echo from subsurface planar flaws.
Materials Evaluation, vol. 35, No 1, pp. 46, 1977
- [38] Baborovsky V.M., Marsh D.M., Slater E.A.
Schlieren and computer studies of interaction of ultrasound with defects.
Non-destructive Testing, vol. 6, No 8, pp. 200, 1973
- [39] Rose J.L., Meyer P.A.
Model for ultrasonic field analysis in solids.
JASAP vol. 57, No 3, pp. 598, 1975
- [40] Glagoliev A.E., Martynienko C.V.
Ocenka približenja metodov razčeta akustičeskich poliej.
Defektoskopija, No 1, str. 63, 1985
- [41] Singh G.P., Rose J.L.
A simple model for computing ultrasonic beam behavior of broad band transducer.
Materials Evaluation, vol. 40, No 6, pp. 880, 1982
- [42] Harumi K.
Motion picture of the computer simulation of elastic waves in solids /reflection of the longitudinal wave by a crack/.
Mat. Conf. Ultrasonic Int. Brighton 1981, pp. 194
- [43] Harumi K., Saito T., Fujimori T.
Motion pictures of the computer simulation of elastic wave from transducer.
Mat. 2FASE Warsaw 1978, pp. 51
- [44] Fukuhara H., Saito T.
Numerical calculation of probe index and beaming angle of ultrasonic angle probe.
Mat. 12WCNDT Las Vegas 1985, pp. 1032

- [45] Kutzner J., Wüstenberg H., Mährle W., Schulz E.
Zonenaufteilung, Empfindlichkeitseinstellung und
Prüfkopfhaltung bei der manuellen Ultraschallprüfung
mit dem Tandemverfahren.
Materialprüfung, vol. 17, No 7, pp. 246, 1975
- [46] Erhard A., Kutzner J., Wüstenberg H., Mundry E.
Abhängigkeit der Echoanzeige von nutartigen Reflektoren
vom Prüfkopfschallfeld und von der Frequenz.
Materialprüfung, vol. 19, No 9, pp. 379, 1977
- [47] Wüstenberg H., Kutzner J., Engl G.
Dependences of echo amplitude on defect orientation
in ultrasonic examination.
Mat. 8WCNDT Cannes 1976, ref. 3H4
- [48] Szalązek J.
Numeryczne modelowanie zależności poziomu echa refle-
ktora od położenia głowicy.
Mat. 300SA Gdańsk 1983, tom 3, str. 399
- [49] Walte F., Müller W.
Das Verhalten flachiger, rissartiger Reflektoren in
fokussierte Ultraschallfeldern.
Materialprüfung, vol. 25, No 5, pp. 155, 1983
- [50] Rachimov V.F., Gorodkov V.E., Tkačenko V.A., Zaleskij V.V.
Teoretičeskije issledovania vlnania plaskoj, bokovoj
povierchnosti na akustičeskij trakt defektoskopa.
Defektoskopija, No 3, str. 89, 1981
- [51] Gorodkov V.E., Rachimov V.F., Ermolov I.N.
O vlnanii bokovoj povierchnosti izdielia na akustičeskij
trakt impulsnogo defektoskopa.
Defektoskopija, No 3, str. :, 1982
- [52] Kwaszczyńska-Klimek A., Szalązek J.
Wpływ krawędzi na pomiary czasu przejścia fal ultra-
dźwiękowych.
Mat. 13KKBN Kiekrz 1985, ref. R-29
- [53] Krautkrämer J.
Fehlergrossenermittlung mit Ultraschall.
Arch. Eisenhütten, vol. 30, pp. 693, 1959
- [54] Marini J., Rivenez J.
Acoustical fields from rectangular ultrasonic transdu-
cers for nondestructive testing and medical diagnosis.
Ultrasonic, vol. 11, No 12, pp. 251, 1974
- [55] Ermolov I.N., Ščerbinskij V.G.
Ob ispolzovanii ARD diagramm pri kontrolie naklonnym
iskatieleem.
Defektoskopija, No 6, str. 41, 1970

- [56] Schlengermann U.
Normalizing distance-amplitude-curves of side-drilled holes in ultrasonic testing.
Materials Evaluation, vol. 39, No 11, pp. 1138, 1981
- [57] PN-77/M-70055
Badania nieniszczące. Metody ultradźwiękowe. Badania spoin w złączach doczołowych.
- [58] Wells C.D.
DGS and sensitivity.
The Brit. J. of NDT, vol. 17, No 2, pp. 24, 1975
- [59] Rose J.L., Schlemm H.
Equivalent flaw size measurement and characterization analysis.
Materials Evaluation, vol. 34, No 1, pp. 1, 1976
- [60] Ammirato F.
The influence of reference defect geometry, beam angle and frequency on shear wave ultrasonic test sensitivity.
Materials Evaluation, vol. 34, No 2, pp. 45, 1976
- [61] Schlengermann U.
Rating of sound fields by phase determination of favourable zones for the evaluation of pulse echo amplitude.
Mat. 12WCNDT Las Vegas 1985, pp. 776
- [62] Schlengermann U.
Das Krautkrämer Taschenbuch.
Krautkrämer GmbH Köln, 1976
- [63] Gericke O.R.
Determination of the geometry of hidden defects by ultrasonic pulse analysis testing.
JASA, vol. 35, No 2, pp. 351, 1962
- [64] Seiger H., Wagner J.
Flaw classification by a spectral division of ultrasonic echoes.
Mat. 3 European Conf. on NDT Florence 1984, pp. 191
- [65] Newbold O.
Ultrasonic flaw analysis without a computer.
Mat. 12WCNDT Las Vegas 1985, pp. 872
- [66] Böttcher B., Schulz E., Wüstenberg H.
A new method of crack depth determination in ultrasonic material testing.
Mat. 7WCNDT Warsaw 1973, tom 2, str. 423
- [67] Ogilvy J.A., Temple J.A.
Diffraction of elastic wave by crack: application of time of flight inspection.
Ultrasonics, vol. 21, No 11, pp. 259, 1983

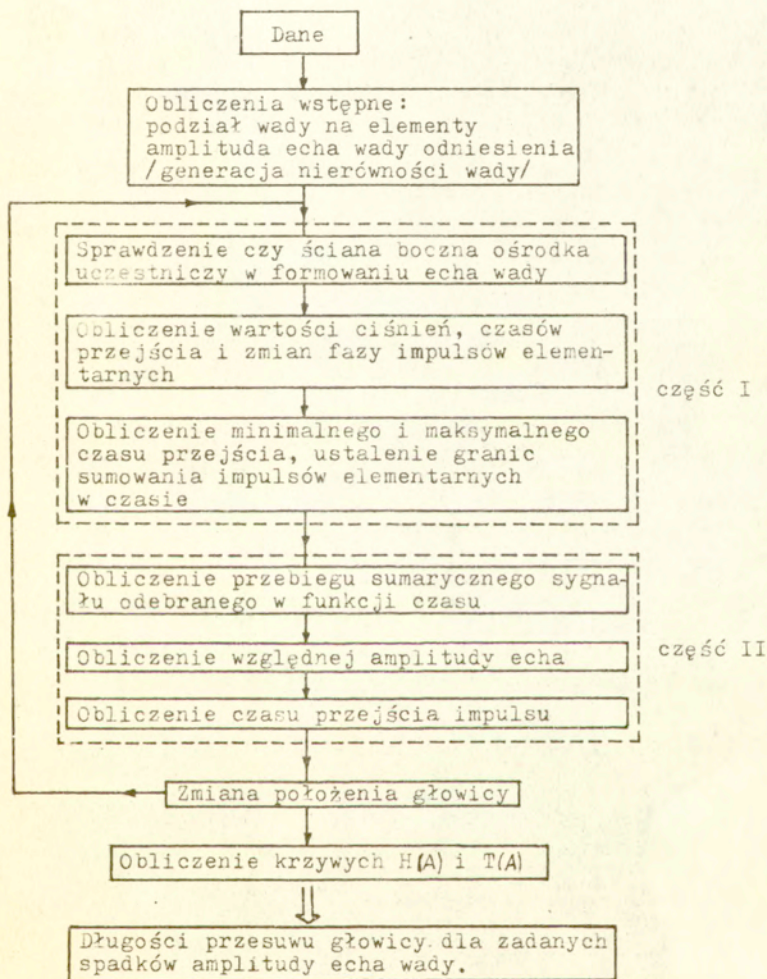
- [68] Charlesworth J.P., Lidington B.M., Silk M.G.
Defect sizing using ultrasonic flaw diffraction.
Mat. 2 European Conf. on NDT Mainz 1978, pp. 4/55
- [69] Silk M.G.
Ultrasonic diffraction as a tool for inspection.
Mat. Conf. EUROTEST Brussels 1982, ref. SV-4
- [70] Grigoriev M.V., Gurvich A.K., Grebiennikov V.V.,
Markielova E.E.
Issledovanie sposoba izmiereniya razmierov objomnykh
defektov pri ultrazvukovom kontroli.
Defektoskopiya, No 5, str. 4, 1982
- [71] Górzny J.
Pomiary średnicy otworów cylindrycznych za pomocą
fal poprzecznych.
Mat. 13KKBN Kuzubnik 1984, ref. R-18
- [72] Lam F.K., Tsang W.M.
Flaw characterization based on diffraction of ultra-
sonic waves.
Ultrasonic, vol. 22, No 1, pp. 14, 1985
- [73] Bouami D., De Vadder D.
Monitoring of crack growth by an ultrasonic technique.
Mat. 12WCNDT Las Vegas 1985, pp. 1798
- [74] Seydel J.
Ultrasonic synthetic-aperture focussing techniques
in NDT.
Research Techn. in NDT, vol. 6, Academic Press 1982
- [75] Petersen D.K., Bennett S.D., Kino G.S.
Real-time NDE of flaws using a digital acoustic imaging
system.
Materials Evaluation, vol. 40, No 11, pp. 1256, 1982
- [76] Burch S.F., Burton J.T.
Ultrasonic synthetic aperture focussing using planar
pulse-echo transducers.
Ultrasonics, vol. 48, No 12, pp. 275, 1984
- [77] Thomson R.N.
Transverse and longitudinal resolution of the synthetic
aperture focussing technique.
Ultrasonic, vol. 48, No 1, pp. 9, 1984
- [78] Barabian O.A., Grohs B., Licht R.
Signalanhebung durch Entstörung von Laufzeit-Messwerten
aus Ultraschallprüfungen von ferritischen und austeniti-
schen Werkstoffen. ALOK Teil 1.
Materialprüfung, vol. 23, No 11, pp. 379, 1981

- [79] Grohs B., Barabian O.A., Kappes W., Paul H.
Fehlerbeschreibung nach Art, Lage und Dimension mit
Hilfe von Laufzeit-Orstkurven aus Ultraschallprüfungen.
Materialprüfung, vol.23, No12, pp.427, 1981
- [80] Gebhardt W., Bonitz F., Woll H.
Ultrasonic phased arrays.
Mat. Conf. EUROTEST Brussels 1982, ref.SVI 2
- [81] Wüstenberg H., Haufe U., Erhard A.
Contribution of the ultrasonic detection and sizing
of inner wall surface-breaking cracks in pipe.
Materials Evaluation, vol.42, No8, pp.1142, 1984
- [82] McNab A., Muir G.
Flaw sizing of real defects.
The Brit.J.of NDT, vol.17, No5, pp.130, 1975
- [83] Holler P., Gebhardt W., Müller W.
Erkennung rissartigen Fehler und Bestimmung der Risspara-
meter bei zerstörungsfreien Prüfungen mit Ultraschall.
Materialprüfung, vol.22, No1, pp.32, 1980
- [84] Doyle P.A., Scala C.M.
Crack depth measurement by ultrasonic: a review.
Ultrasonics, vol.16, No6, pp.164, 1978
- [85] DIN 54125. Prüfung von Schweissverbindungen mit Ultra-
schall. 1982.
- [86] BS 3923. Method for ultrasonic examination of welds.
- [87] PN-86/M-69...Klasyfikacja spoin doczołowych na podsta-
wie wyników badań ultradźwiękowych /projekt/.
- [88] ASTM Standard E273 83. Practice for ultrasonic examina-
tion of longitudinal welded pipe and tubing.
- [89] ČSN 015022. Zkouseni materialu a výrobku ultrazvukem.
Stanovení nahradní velikosti vady.
- [90] BN-84/0601-13. Badania ultradźwiękowe wyrobów hutniczych.
- [91] Szelażek J., Deputat J.
Wybrane zagadnienia ocena rozmiarów wad w badaniach
ultradźwiękowych.
Mat. 12KKBN Rydzyna 1983, str.45
- [92] Gurvich A.K., Ermolov I.N.
Ultrazvukovoj kontrol svarnych švov.
Technika, Kijów 1972
- [93] Obraz J.
Ultradźwięki w technice pomiarowej.
WNT Warszawa 1983

- [94] Volcenko V.N.
Kontrol kačestwa svarki.
Mašinostrojenie, Moskwa 1975
- [95] Malecki I.
Teoria fal i układów akustycznych.
PWN, Warszawa 1964
- [96] Achenbach J.D., Gautesen A.K., McMaken H.
Ray method for waves in elastic solids.
Pitman Advanced Publ. Program, 1982
- [97] Silk H.G.
Ultrasonic transducers for nondestructive testing.
Adam Higler Ltd, Bristol 1984
- [98] Rose J.L.
Effects of selected electrode shapes on basic
ultrasonic fields parameters.
Materials Evaluation, vol. 34, No5, pp. 114, 1976
- [99] Krautkrämer J., Krautkrämer H.
Ultrasonic testing of materials.
Springer Verlag 1983
- [100] Deputat J.
Badania ultradźwiękowe. Podstawy.
Mat. szkoleniowe IMŻ Gliwice 1979
- [101] Wüstenberg H., Schulz E., Möhrle W., Kutzner J.
Zur Auswahl der Membranenformen bei Winkelprüfköpfen
für die Ultraschallprüfung.
Materialprüfung, vol. 18, No7, pp. 223, 1976
- [102] Ermolov I.N.
The reflection of ultrasonic waves from artificial
targets for the angle beam probe testing.
Mat. 7 WC NDT Warsaw 1973, tom 2, str. 445
- [103] Brehovskih L.M.
Volny v sloistych sredach.
Izd. Akademii Nauk SSSR 1957

ZĄŁĄCZNIK 1

Schemat logiczny i opis działania programu
KRZYWE $H(A)$ I $T(A)$ - GŁOWICA NORMALNA - FALE PODŁUŻNE



Danymi wejściowymi do obliczenia długości przesuwu głowicy są:

- D - wymiar boku przetwornika
- f - częstotliwość drgań przetwornika
- T_n - czas narastania impulsu
- T_o - czas opadania impulsu
- d - wymiar reflektora
- z - odległość reflektora od linii przesuwu przetwornika
- E - odległość reflektora od bocznej ściany
- d_o - wymiar reflektora odniesienia
- z_o - odległość reflektora odniesienia
- c_l - prędkość propagacji fal podłużnych
- c_T - prędkość propagacji fal poprzecznych
- α_l - współczynnik tłumienia fal podłużnych o danej częstotliwości.
- A_o - położenie początkowe przetwornika
- A_s - skok przetwornika
- A_k - położenie końcowe przetwornika
- Q_g - charakterystyka kierunkowości wiązki /tabelarycznie/
- n - ilość elementów przetwornika
- m - ilość elementów reflektora
- ΔH - spadek amplitudy echa wady
- ΔZ - maksymalna wysokość nierówności powierzchni reflektora.

Obliczenia wstępne obejmują obliczenia parametrów niezależnych od położenia przetwornika względem reflektora oraz obliczenia amplitudy echa wady odniesienia. Jest to wada o określonej szerokości, leżąca w zadanej odległości w osi wiązki fal generowanych przez przetwornik.

W I części programu obliczane są wartości ciśnień akustycznych, czasów przejścia i zmian faz impulsów elementarnych docierających do elementów przetwornika po odbiciu od elementów reflektora. Znajdowane są też minimalny i maksymalny czas przejścia impulsów elementarnych.

W II części program sumuje impulsy elementarne z uwzględnieniem kształtu impulsu i zmiany fazy, w zakresie czasów od minimalnego do maksymalnego czasu przejścia impulsu elemer

tarne go powiększonego o czas trwania impulsu.

W wyniku uzyskany jest przebieg sygnału elektrycznego powstającego na przetworniku w funkcji czasu oraz maksymalna wartość tego sygnału. Dalej obliczana jest amplituda echa odniesiona do amplitudy wady wzorcowej /odniesienia/ oraz czas przejścia impulsu.

Obliczenia amplitudy echa powtarzane dla różnych położeń przetwornika dają w wyniku krzywą $H(A)$ i zmiany czasu przejścia impulsu $T(A)$. Stąd wyznaczane są długości przesuwu głowicy odpowiadające wybranym spadkom amplitudy echa wady i związane z nimi zmiany czasu przejścia impulsu.

Dla reflektorów leżących w pobliżu bocznej ściany materiału lub rozpoczynających się od niej, dla każdego z impulsów elementarnych program sprawdza czy ściana boczna bierze udział w formowaniu echa wady i akceptuje lub pomija impulsy elementarne odbite od tej ściany.

ZAŁĄCZNIK 2

Głowica normalna z przetwornikiem prostokątnym
o bokach D_1 i D_2

Stosując głowicę normalną z przetwornikiem prostokątnym uzyskać można dwie różne krzywe $H(A)$ dla tej samej wady, przemieszczając głowicę ponad wadą dwukrotnie, po tej samej linii przesuwu ustawioną raz prostopadle do kierunku ruchu bokiem D_1 , drugi raz - bokiem D_2 . Badana wada o nieznannej szerokości d usytuowana będzie odpowiednio w dwóch odległościach unormowanych Z_1 i Z_2

$$Z_1 = 4 \cdot z \cdot \lambda / D_1^2$$

$$Z_2 = 4 \cdot z \cdot \lambda / D_2^2$$

Długości przesuwu głowicy przy spadku amplitudy echa o 6dB wynosiły będą ΔA_1 i ΔA_2 .

Jeżeli wykryta wada stanowi reflektor „duży”, płaski / tzn. $d \geq 1,6D_1$ oraz $d \geq 1,6D_2$ / stosunek unormowanych długości przesuwów głowic będzie wynosił

$$\frac{\Delta A_1 / D_1}{\Delta A_2 / D_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

Jeżeli wykryta wada stanowi reflektor „mały” / tzn. $d < 1,6D_1$ oraz $d < 1,6D_2$ / to stosunek długości przesuwów głowicy dla tej wady będzie wynosił

$$\frac{\Delta A_1 / D_1}{\Delta A_2 / D_2} > \frac{D_1}{D_2}$$

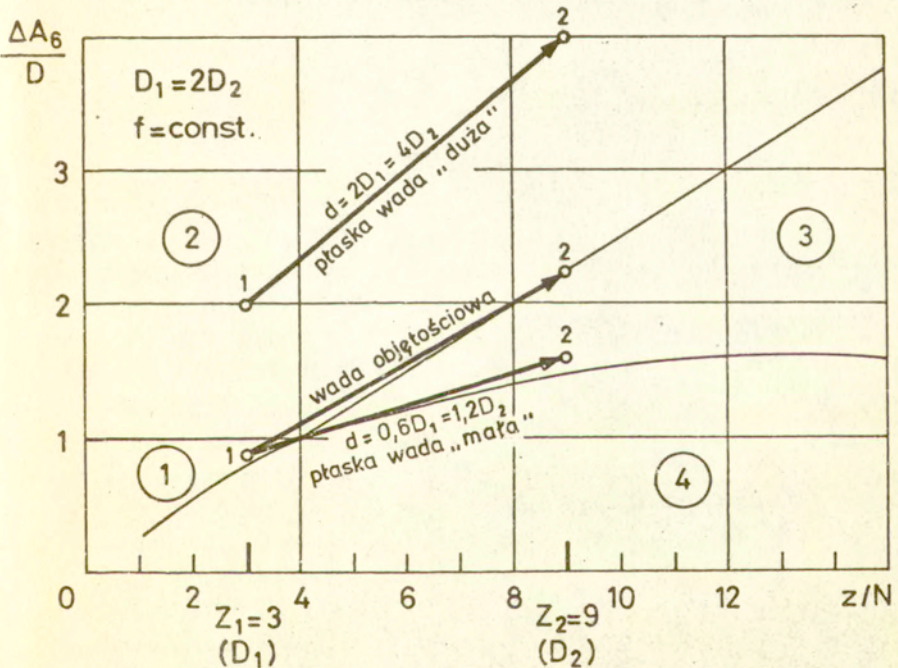
a ponieważ długości przesuwu zależą w tym przypadku nie tylko od wielkości reflektora ale również od odległości Z , stosunek długości przesuwów spełniał będzie warunek

$$\frac{\Delta A_1 / D_1}{\Delta A_2 / D_2} > \frac{Z_1}{Z_2}$$

Dla wady objętościowej /sfera, cylinder/, której charakterystyka kierunkowości wiązki fal odbitych nie zależy od kierunku padania fal na wadę, długości przesuwu głowicy będą proporcjonalne do odległości unormowanych i będą spełniały warunek

$$\frac{\Delta A_1/D_1}{\Delta A_2/D_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Przykładowe wyniki pomiarów dla wymienionych powyżej wad badanych głowicą z przetwornikiem o bokach $D_1 = 2D_2$, nanesione na uniwersalne wykresy PP_{6dB} , pokazano na rys. Z1. Wady leżą w odległościach unormowanych $Z_1 = 3$ i $Z_2 = 9$.



Rys. Z1. Długości przesuwu głowicy dla wad o różnych wielkościach, wykrywanych głowicą z przetwornikiem prostokątnym, nanesione na uniwersalny wykres PP_{6dB} .

Punkty oznaczone cyfrą 1 odpowiadają przesuwom uzyskanym przy przemieszczaniu głowicy w kierunku prostopadłym do boku D_1 i odległości unormowanej $Z_1=3$. Płaska wady o wymiarze $d=2D_1=4D_2$ odpowiada przesuwom $\Delta A_1=2D_1$ i $\Delta A_2=4D_2$ a stosunek ich długości wynosi 0,5. Obydwa wskazania leżą w obszarze ② wykresu.

Płaskiej wadzie o wymiarze $d=0,6D_1=1,2D_2$ odpowiadają przesuwu $\Delta A_1=0,9D_1$ i $\Delta A_2=1,6D_2$ a stosunek ich długości wynosi około 0,56. Wskazania tej wady leżą odpowiednio w obszarach ① i ③ wykresu.

Wada objętościowa /lub bardzo mała wada płaska/ odpowiada przesuwom o długościach $\Delta A_1=0,8D_1$ i $\Delta A_2=2,3D_2$ a ich stosunek wynosi 0,34. Wskazania takiej wady leżą odpowiednio w obszarze ① i na granicy obszaru ② wykresu.

Głowica ze zmienną częstotliwością

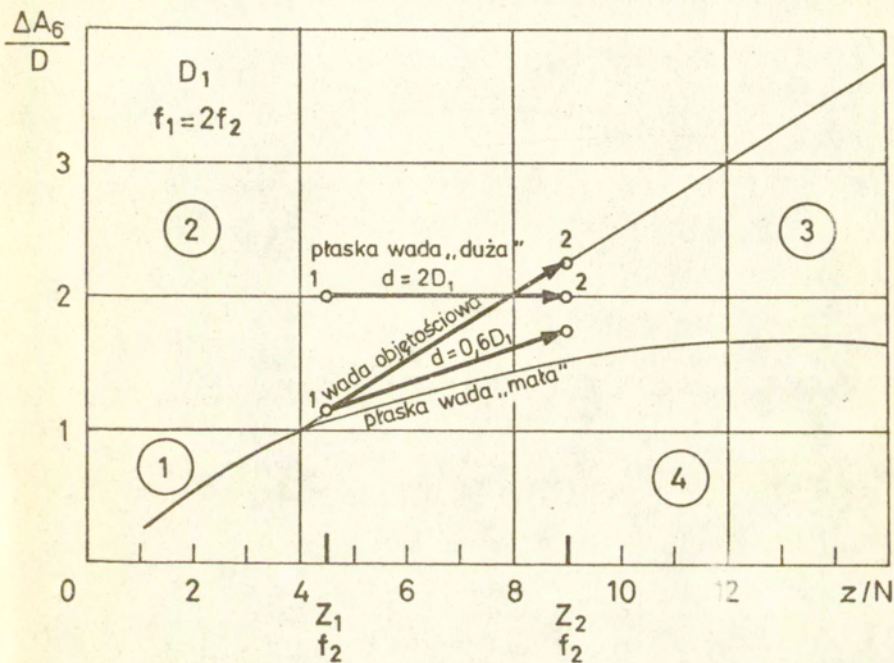
Podobnie wykorzystana może być głowica z okrągłym czy kwadratowym przetwornikiem i zmienną, na przykład w stosunku 1 : 2, częstotliwością drgań przetwornika. W takim przypadku unormowana odległość wady zmienia się w zależności od stosowanej częstotliwości dwukrotnie, stały natomiast pozostaje stosunek wymiaru wady do wymiaru przetwornika d/D .

Dla głowicy wyposażonej w przestrajany przetwornik o boku równym D_1 i częstotliwościach $f_1=0,5f_2$ długości przesuwu dla opisanych powyżej wad $/d=2D_1$, $d=0,9D_1$ i wada objętościowa/ położone będą na uniwersalnym wykresie PP_{6dB} jak to pokazano na rys. Z2.

Zmianie częstotliwości odpowiada dwukrotna zmiana unormowanej odległości z $Z_1=9$ dla f_1 na $Z_2^*=4,5$ dla f_2 .

Wskazania wady „dużej” $/d=2D_1/$ leżą odpowiednio w obszarach ② i ③ wykresu a unormowana wielkość wady d/D_1 jest stała.

Dla pozostałych wad, wraz ze zmianą częstotliwości, zachodzą różne, zależne od wielkości i typu wady, zmiany długości przesuwu głowicy.



Rys.22. Długości przesuwu głowicy o zmiennej częstotliwości drgań przetwornika dla wad o różnych wielkościach, naniesione na uniwersalny wykres PP_{6dB}.

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	str. 6
2. Stan zagadnienia	8
2.1. Rozwój metody PP	8
2.2. Inne metody oceny wielkości wad	22
2.3. Praktyczne zastosowania metody PP	25
2.4. Wnioski wynikające u aktualnego stanu wiedzy	27
3. Cel i zakres pracy	30
4. Ocena wielkości wad metodą PP przy wykorzystaniu	
głowic normalnych	32
4.1. Obliczenia zależności amplitudy echa od	
położenia głowicy	32
4.2. Numeryczne modelowanie zależności amplitudy	
echa od położenia głowicy	43
4.2.1. Badania modelu numerycznego	51
4.3. Badania doświadczalne	54
4.4. Wyniki badań zależności amplituda-położenie	
głowicy dla wad w ośrodku nieograniczonym	57
4.4.1. Długości przesuwu głowicy przy spadku	
amplitudy echa o 6dB	57
4.4.2. Możliwości rozróżniania wad „dużych” od	
„małych”	63
4.4.3. Długości przesuwu głowicy przy spadku	
amplitudy echa o 10 i 20dB	66
4.4.4. Minimalna odległość pomiędzy ścianą boczną	
a wadą	73
4.5. Wyniki badań zależności amplituda-położenie	
głowicy dla wad rozpoczynających się od bocz-	
nej ściany	75
4.6. Wpływ tłumienia i chropowatości powierzchni	
wady na długości przesuwu głowicy	86
4.7. Wnioski dotyczące głowic normalnych	89
5. Ocena wielkości wad metodą PP przy wykorzystaniu	
głowic skośnych	93
5.1. Numeryczne modelowanie zależności amplitudy	
echa od położenia głowicy	95
5.2. Badania doświadczalne	100
5.3. Wyniki badania zależności amplituda-położenie	
głowicy dla wad w ośrodku nieograniczonym	102
5.3.1. Długości przesuwu głowicy o kącie załamania	
równym 45°	102
5.3.2. Długości przesuwu głowicy o kącie załamania	
równym 70°	105
5.4. Wnioski dotyczące głowic skośnych	108
6. Podsumowanie	111
Wykaz literatury	116
Załączniki	125