

MODELOWANIE PROPAGACJI FAL ULTRADŹWIĘKOWYCH W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH

Sławomir MACKIEWICZ
IPPT PAN, Warszawa
smackiew@ippt.gov.pl

1. WSTĘP

Modelowanie rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w obiekcie badania odgrywa kluczową rolę w planowaniu badań ultradźwiękowych, począwszy od najbardziej elementarnego poziomu zastosowań a skończywszy na zaawansowanych technikach ultradźwiękowych wdrażanych we współczesnym przemyśle. W szerokim ujęciu pod pojęciem modelowania możemy rozumieć umiejętność przewidywania i mniej lub bardziej dokładnego obrazowania drogi, trajektorii lub obszaru materiału gdzie propagują się fale ultradźwiękowe i mogą oddziaływać ze strukturą materiału. Metody wykorzystywane do tak rozumianego modelowania mogą opierać się różnych koncepcjach fizycznych i mieć bardzo zróżnicowany stopień dokładności i złożoności matematycznej. Istotą problemu, z punktu widzenia praktyki badań nieniszczących, jest taki dobór modelu propagacji fal ultradźwiękowych aby pozwalał on na wyciągnięcie istotnych i miarodajnych wniosków dotyczących określonego zadania badawczego. Nie zawsze konieczne jest sięganie po specjalistyczne programy komputerowe, kosztujące po kilkadziesiąt tysięcy dolarów, aby prawidłowo zaprojektować technikę ultradźwiękową do zbadania nietypowego elementu. W wielu przypadkach wystarcza umiejętne wykorzystanie podstawowej wiedzy kursowej oraz zwykły kalkulatora. W innych jednak konieczne jest zastosowanie zaawansowanych metod numerycznych i specjalnych programów komputerowych.

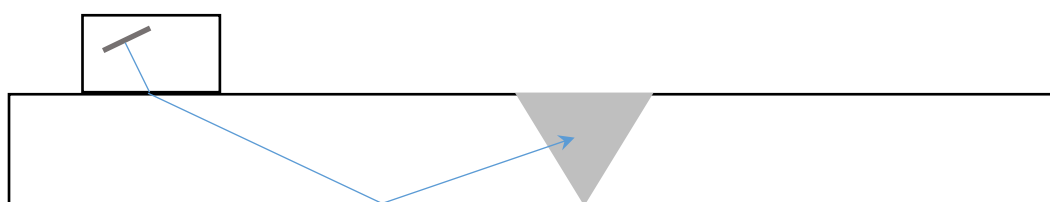
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie różnych technik i poziomów modelowania propagacji fal ultradźwiękowych w materiale wraz z pokazaniem ich przykładowych zastosowań do planowania technik badawczych. Stosowane podejścia podzielono umownie na cztery poziomy o wzrastającym stopniu trudności i zaawansowania matematycznego. Pierwszy, najbardziej elementarny poziom polega na wyznaczeniu trajektorii promienia centralnego wiązki ultradźwiękowej wytworzonej przez głowicę. Na drugim poziomie staramy się wyznaczyć cały profil wiązki ultradźwiękowej czyli zarówno promień centralny jak też skrajne promienie boczne, na których amplituda fali spada o określoną liczbę decybeli. Obliczenia na tych poziomach można zrealizować w oparciu o podstawową wiedzę ultradźwiękową bez użycia specjalnych narzędzi programowych.

Kolejne poziomy, trzeci i czwarty, wymagają zastosowania specjalnych programów komputerowych do symulacji propagacji fal ultradźwiękowych. Poziom trzeci wykorzystuje tzw. technikę *ray tracing* polegającą na wyznaczeniu i śledzeniu trajektorii wielu promieni wiązki ultradźwiękowej. Zasadniczym atutem tej techniki, w porównaniu do technik podstawowych, jest możliwość modelowania propagacji wiązki ultradźwiękowej w elementach o złożonym kształcie (np. osie, wały, szyny kolejowe) w dowolnym kierunku, czyli w ujęciu 3D. Umożliwia ona ponadto śledzenie trajektorii promieni odbitych od dowolnie zdefiniowanych nieciągłości (wad) materiału. Jest to obecnie podstawowa technika

symulacji numerycznej w ultradźwiękowych badaniach defektoskopowych. Jednak nawet zaawansowana technika *ray tracing* posiada pewne ograniczenia, mające znaczenie w technikach badawczych wykorzystujących zjawiska dyfrakcyjne. W takich przypadkach może być konieczne bezpośrednie rozwiązanie równania falowego opisującego ruch ośrodka sprężystego w całej objętości elementu z uwzględnieniem odpowiednich warunków brzegowych na jego granicach i nieciągłościach. Rozwiązanie takie można uzyskać np. metodą elementów skończonych MES. Zastosowanie metody MES stanowi najbardziej zaawansowany matematycznie, czwarty poziom modelowania uwzględniający wszystkie zjawiska związane z propagacją fal ultradźwiękowych. Należy jednak podkreślić, że jest to podejście niezwykle kosztowne pod względem czasu obliczeniowego i w praktyce nie nadaje się do rutynowego planowania badań ultradźwiękowych obiektów przemysłowych. Jego zastosowanie ogranicza się raczej do analizowania pewnych określonych oddziaływań fali ze strukturą ośrodka sprężystego jak np. rozpraszanie fali ultradźwiękowej na wierzchołku szczeliny czy też analiza propagacji fali wzdłuż powierzchni materiału.

2. ELEMENTARNY MODEL PROPAGACJI

Najbardziej elementarny sposób modelowania propagacji fali ultradźwiękowej w badanym materiale polega na schematycznym wyznaczeniu drogi wzdłuż której mają rozchodzić się fale ultradźwiękowe wytworzone przez głowicę. Jest to zazwyczaj pierwszy schemat obrazowania badania ultradźwiękowego wykorzystywany na kursach badań ultradźwiękowych. Typowy przykład zastosowania tego modelu do badania złącza spawanego pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Elementarny sposób modelowania propagacji fali ultradźwiękowej wytworzonej przez głowicę kątową.

Model taki przyjmuje szereg istotnych uproszczeń i założeń, które jednak nie wykluczają jego efektywnego wykorzystania w praktyce. Po pierwsze zakłada on, że rysowana linia reprezentuje oś centralną wiązki ultradźwiękowej wzdłuż której propaguje się największa część energii fali ultradźwiękowej. Pomija się jednak faktyczną szerokość wiązki ultradźwiękowej oraz jej rozbieżność. Jest to model propagacji fal ultradźwiękowych uproszczony do poziomu optyki geometrycznej.

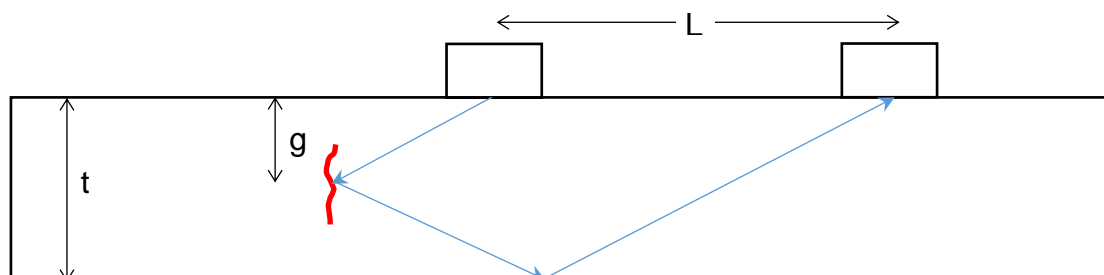
Drugim kluczowym założeniem tego modelu jest to, że oś wiązki odbija się, załamuje i transformuje na granicach ośrodków zgodnie z prawem Snelliusa, czyli tak jak to udowodniono dla fali płaskiej rozchodzącej się w nieograniczonym ośrodku sprężystym. Należy jednak zauważyć, że rzeczywista wiązka ultradźwiękowa dalece odbiega od teoretycznej fali płaskiej i jest to jedynie pewne przybliżenie, które wystarczająco dobrze sprawdza się w większości zastosowań.

Pomimo tych uproszczeń model propagacji fali ultradźwiękowej zapożyczony z optyki geometrycznej pozwala na prawidłowe przewidywanie i planowanie wielu aspektów badania ultradźwiękowego. Jako pierwszy przykład rozpatrzmy badanie spoiny czołowej pokazane na rys. 1. Analizując przedstawiony schemat można np. wyliczyć jaki kąt głowicy należy zastosować aby skutecznie wykrywać przyklejenia do ścianki bocznej spoiny. Jeśli kąt

ukosowania materiału rodzimego wynosi α to optymalny kąt głowicy β do wykrywania przyklejeń bocznych dany jest wzorem:

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (1)$$

Model optyki geometrycznej pozwala na skuteczne przygotowanie konfiguracji skanów ultradźwiękowych dla znacznie bardziej złożonych geometrii złączy spawanych takich jak złącza teowe, kątowe, krzyżowe a nawet spoiny króćców. Jako kolejny przykład jego skutecznego zastosowania rozpatrzmy badanie grubościennego elementu techniką tandem w celu wykrywania pęknięć wewnętrznych zorientowanych prostopadłe do powierzchni materiału.



Rys. 2. Wyznaczanie parametrów badania techniką tandem przy wykorzystaniu prostego modelu optyki geometrycznej.

Rozpatrując schemat propagacji fali pokazany na rys. 2 można obliczyć odległość L między głowicami wymaganą aby tandem głowic kątowych $T45^\circ$ wykrywał pęknięcia znajdujące się głębokości g pod powierzchnią materiału. Odpowiedni wzór obliczeniowy ma postać.

$$L = 2(t - g) \quad (2)$$

Można nieco skomplikować powyższe zadanie zakładając, że wykrywane pęknięcia nie muszą być idealnie prostopadłe do powierzchni lecz mogą odchyłać się od prostopadłości o pewien kąt α . W tym przypadku rozważany model geometryczny doprowadzi do wniosku, że optymalna odległość między głowicami L powinna wynosić:

$$L = (2t - g)tg(45^\circ - 2\alpha) - g \quad (3)$$

w przypadku gdy pęknięcia nachylone są pod kątem α w kierunku głowic, lub też:

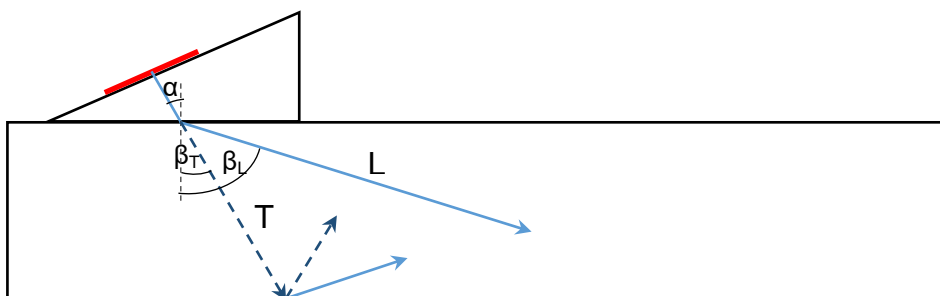
$$L = (2t - g)tg(45^\circ + 2\alpha) - g \quad (4)$$

w przypadku gdy pęknięcia nachylone są pod kątem α w kierunku od głowic.

Widać, że model optyki geometrycznej wykazuje praktyczną przydatność przy planowaniu badania ultradźwiękowego techniką tandem, jednak przy nieco dokładniejszym rozpatrzeniu problemu widać także jego ułomności. W praktyce chcielibyśmy np. wiedzieć ile skanów ultradźwiękowych techniką tandem należy wykonać aby skutecznie wykryć pęknięcia na całej grubości materiału. Model propagacji nie uwzględniający szerokości wiązki ultradźwiękowej nie pozwoli na uzyskanie odpowiedzi na to pytanie.

Kolejnym skutecznym zastosowaniem modelu optyki geometrycznej w badaniach ultradźwiękowych jest obliczanie kątów załamania i transformacji fal ultradźwiękowych na

granicach ośrodków. Wykorzystując wspomniane już prawo Sneliusa można wyliczyć prawidłowe kąty klinów głowic kątowych fal poprzecznych i podłużnych a także kąty padania fal podłużnych na powierzchnię materiału w badaniach zanurzeniowych. Jako przykład rozpatrzmy projektowanie głowicy kątovej fal podłużnych do badania TOFD. Chcemy aby głowica wprowadzała do stali fale podłużne pod kątem 60° . W celu wyznaczenia kąta klina załamującego głowicy wykonanego z PMM można posłużyć się modelem geometrycznym pokazanym na rys. 3.



Rys. 3. Model geometryczny wykorzystywany przy projektowaniu głowicy kątovej fal podłużnych do badań TOFD.

Jeśli kąt załamania fali podłużnej w stali - β_L wynosić 60° to wymagany kąt padania fali podłużnej w klinie - α można wyliczyć ze wzoru:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_L} = \frac{V_{PMM}}{V_L} \quad (5)$$

Po podstawieniu odpowiednich wartości na prędkość fali podłużnej w klinie ($V_{PMM} = 2,7$ mm/us) oraz w stali ($V_L = 5,92$ mm/us) wzór ten daje kąt α równy $23,2^\circ$. Jest to jednocześnie wymagany kąt klina głowicy kątovej L60°.

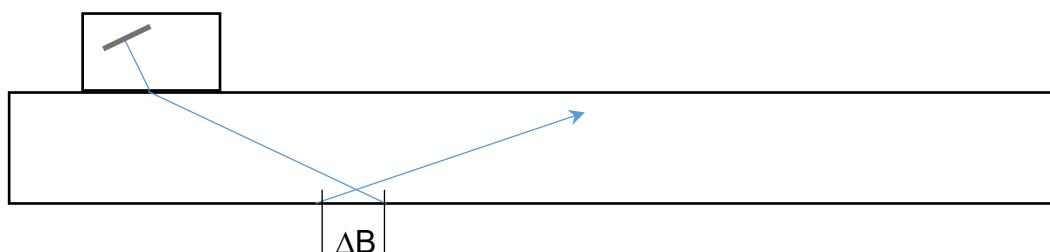
Rozpatrywany model geometryczny pozwala na uzyskanie dodatkowych ważnych informacji dotyczących działania projektowanej głowicy. W szczególności prowadzi on do wniosku, że przedmiotowa głowica będzie, oprócz fali podłużnej, wytwarzać także falę poprzeczną wprowadzaną do materiału pod kątem β_T , który można wyliczyć z następującego wzoru:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_T} = \frac{V_{PMM}}{V_T} \quad (6)$$

Po podstawieniu odpowiednich wartości na prędkość fali poprzecznej w stali ($V_T = 3,25$ mm/us) oraz na kąt $\alpha = 23,2^\circ$ otrzymujemy, że kąt wprowadzenia fali poprzecznej będzie wynosił $\beta_T = 28,2^\circ$. Kontynuując analizę przedmiotowego modelu dochodzimy do kolejnego ważnego wniosku, dotyczącego badania głowicą L60°. Otóż analizując prawa Sneliusa dla odbicia od powierzchni przeciwległej widzimy, że zarówno fala poprzeczna jak i fala podłużna przy każdym odbiciu będą ulegać częściowej transformacji. W szczególności z fali typu T powstaną dwie fale odbite, jedna typu T druga typu L (patrz rys. 3). Podobnie będzie dla fali typu L. W efekcie widzimy, że zastosowany model daje złożony i użyteczny obraz propagacji fal ultradźwiękowych w badaniu prowadzonym głowicą L60°. Uzyskane informacje mają istotne znaczenie przy planowaniu i interpretacji wyników takiego badania.

Jak widać z przedstawionych przykładów prosty model propagacji fal ultradźwiękowych zapożyczony z optyki geometrycznej pozwala nie tylko na poglądowe przedstawienie elementarnych zasad badania ultradźwiękowego lecz również na ilościowe

obliczenia istotnych parametrów wielu technik ultradźwiękowych. Jego najbardziej oczywistą wadą jest brak jakiegokolwiek uwzględnienia rozmiarów poprzecznych oraz rozbieżności wiązki ultradźwiękowej. Należy także podkreślić, że stosowanie prawa Snelliusa do opisu propagacji osi wiązki ultradźwiękowej na granicach ośrodków jest jedynie pewnym przybliżeniem a nie ścisłym prawem fizyki. Praktycznym przykładem odstępstwa od tak pojętego „prawa” jest przesunięcie osi wiązki ultradźwiękowej przy odbiciu od powierzchni badanego elementu zwane także efektem *Schocha* [3]. Efekt ten dotyczy głowic ultradźwiękowych fal poprzecznych o kątach załamania większych lub mniejszych od 45°. Z przeprowadzonych pomiarów [4] wynika, że przesunięcie „do tyłu” osi wiązki ultradźwiękowej wytworzonej przez głowicę o częstotliwości 2 MHz i kącie załamania 70° wynosi $\Delta B = 3,3$ mm. Efekt ten, zilustrowany graficznie na rys. 4, może mieć praktyczne znaczenie przy dokładnym wyznaczaniu położenia wykrywanych wad.



Rys. 4. Efekt przesunięcia osi wiązki ultradźwiękowej przy odbiciu.

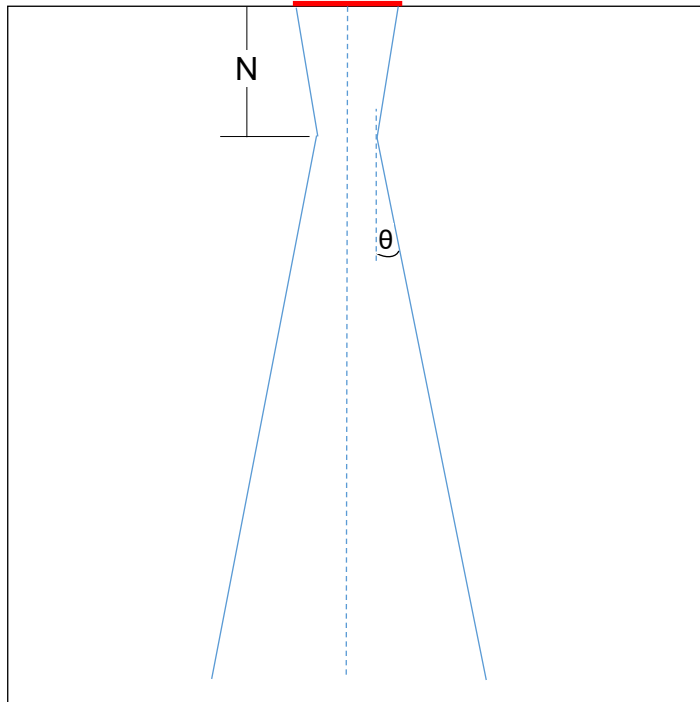
3. WIĄZKA ULTRADŹWIĘKOWA I JEJ PARAMETRY

Następny, wyższy poziom modelowania propagacji fal ultradźwiękowych w materiale opiera się na pojęciu wiązki ultradźwiękowej wytwarzanej przez drgający przetwornik głowicy ultradźwiękowej. Pojęcie to zostało wprowadzone i szczegółowo opisane w podstawowych monografiach i podręcznikach badań ultradźwiękowych [1-3].

Punktem wyjścia jest tutaj teoretyczny opis pola ultradźwiękowego (ściślej jego ciśnienia akustycznego) przy wykorzystaniu zasady Huygensa. Mówi ona, że ciśnienie akustyczne w danym punkcie pola jest sumą ciśnień kulistych fal cząstkowych wytworzonych przez wszystkie punkty tworzące aktywną powierzchnię przetwornika. W izotropowym ośrodku sprężystym zasadę tą można wyrazić w postaci całkowego wzoru Rayleigha [3]:

$$p(\mathbf{r}) = \iint \frac{p_0 e^{-ikr}}{\lambda r} dS \quad (7)$$

Całkowanie odbywa się po całej aktywnej powierzchni przetwornika zaś p_0 oznacza ciśnienie akustyczne przy jego powierzchni, k – liczbę falową, λ – długość fali, r – odległość między punktem pola a bieżącym punktem całkowania na powierzchni przetwornika. Wykonanie powyższego całkowania dla przetwornika przyłożonego do płaskiej powierzchni ośrodka sprężystego prowadzi do uzyskania modelowego rozkładu pola ultradźwiękowego, określanego mianem wiązki ultradźwiękowej. Schematyczny obraz wiązki ultradźwiękowej pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Schematyczny obraz wiązki ultradźwiękowej głowicy normalnej z przetwornikiem kołowym drgającym grubościowo.

Wiązkę ultradźwiękową dzieli się zwykle na dwa obszary, pole bliskie i pole dalekie, charakteryzujące się różnymi właściwościami ciśnienia akustycznego. Obszar pola bliskiego rozciąga się od powierzchni przetwornika do ostatniego maksimum ciśnienia na osi wiązki, znajdującego w odległości N od przetwornika (patrz rys. 5). W obszarze tym występują naprzemienne maksima i minima ciśnienia, jednak ogólna szerokość wiązki jest w przybliżeniu stała i zbliżona do średnicy przetwornika. Należy też podkreślić, że różnice amplitud pomiędzy lokalnymi maksimami i minimami są tym mniejsze im krótsze są impulsy ultradźwiękowe generowane przez przetwornik. Dla głowic szerokopasmowych większość fluktuacji praktycznie zanika i pozostaje jedynie ostatnie wyraźne maksimum położone w odległości N na osi wiązki.

Długość pola bliskiego - N zależy od kształtu przetwornika oraz rozkładu ciśnienia akustycznego na jego powierzchni. Dla najczęściej rozważanego przetwornika kołowego, drgającego tłokowo (p_0 stałe na całej powierzchni) wzór na długość pola bliskiego ma postać:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (8)$$

gdzie D – średnica przetwornika, λ – długość fali w ośrodku propagacji. Dla przetworników w kształcie prostokąta długość pola bliskiego N , dana jest nieco bardziej złożonym wzorem:

$$N = \frac{4a^2}{\lambda} \frac{(1+n^2)(0,78-0,27n)}{\pi} \quad (9)$$

gdzie a jest długością dłuższego boku prostokąta, zaś $n = b/a$ stosunkiem krótszego do dłuższego boku. Ze wzoru tego wynika, że najdłuższe pole bliskie ma przetwornik prostokątny o równych bokach czyli kwadrat.

W polu dalekim obliczenia wykonane na podstawie wzoru (7) wykazują monotoniczny i równomierny spadek ciśnienia akustycznego fali wraz z odległością od przetwornika głowicy. W dalszym polu dalekim spadek ten można wyrazić niżej podaną zależnością:

$$p(r) = \pi p_0 \frac{N}{r} \quad (10)$$

Jednocześnie obliczenia na podstawie wzoru (7) pozwalają wyznaczyć zależność kierunkową ciśnienia fali ultradźwiękowej w polu dalekim. Dla przetwornika kołowego o średnicy D jest ona dana wzorem:

$$p(r, \phi) = p(r) \frac{2J_1(x)}{x} \quad (11)$$

gdzie:

$$x = \frac{\pi}{\lambda} D \sin \phi$$

$J_1(x)$ – funkcja Bessela 1 rodzaju,

ϕ – kąt kierunkowy liczony od osi wiązki

Analogiczny wzór na rozkład ciśnienia w polu dalekim przetwornika prostokątnego o długości boków a, b ma postać [3]:

$$p(r, \phi, \psi) = p_0 \frac{4ab}{\lambda r} \frac{\sin(x)}{x} \frac{\sin(y)}{y} \quad (12)$$

gdzie:

$$x = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \phi, \quad y = \frac{\pi}{\lambda} b \sin \psi$$

ϕ – kąt kierunkowy liczony od osi wiązki w płaszczyźnie równoległej do boku a

ψ – kąt kierunkowy liczony od osi wiązki w płaszczyźnie równoległej do boku b

Jak widać w przypadku przetwornika prostokątnego rozbieżność wiązki zależy od kierunku odchylenia od osi i jest większa dla odchylenia w płaszczyźnie krótszego boku b .

Wzory na kierunkowy rozkład ciśnienia fali w polu dalekim (11), (12) pozwalają wyliczyć kąt rozbieżności wiązki dla dowolnie przyjętego spadku amplitudy ciśnienia fali ultradźwiękowej. Ponieważ w niektórych opracowaniach zdarzają się w tym zakresie błędy lub niejasności poniżej zestawiono prawidłowe wzory obliczeniowe na kąty rozbieżności wiązki przetwornika kołowego dla trzech typowych wartości spadku amplitudy: -3 dB, -6 dB oraz -20 dB.

$$\begin{aligned} \sin(\phi_{-3dB}) &= 0,514 \frac{\lambda}{D} \\ \sin(\phi_{-6dB}) &= 0,703 \frac{\lambda}{D} \\ \sin(\phi_{-20dB}) &= 1,09 \frac{\lambda}{D} \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie:

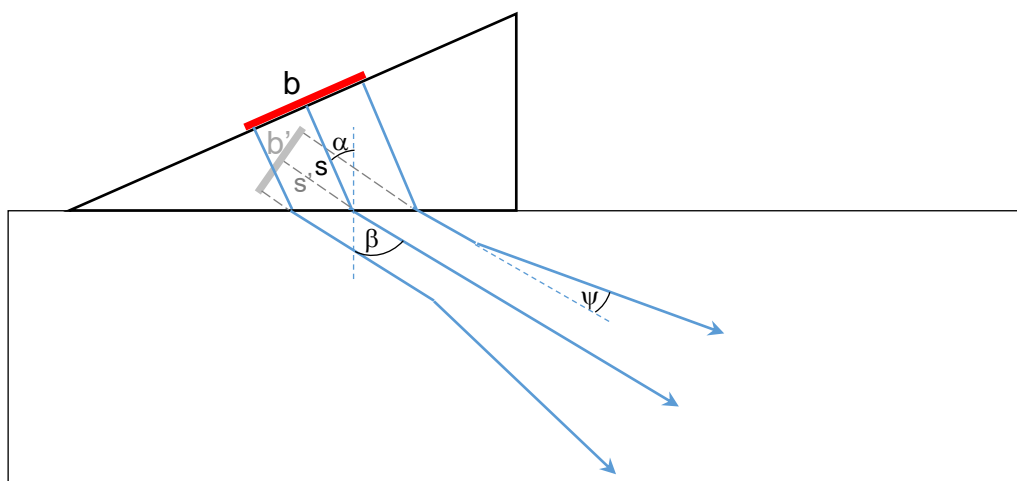
λ – długość fali w ośrodku propagacji,

D – średnica przetwornika kołowego

Osobnego omówienia wymaga problem obliczania parametrów wiązki ultradźwiękowej dla przetworników prostokątnych. Wzory (9) i (12) określają te parametry jedynie w przypadku gdy przetwornik o takim kształcie wprowadza fale bezpośrednio do materiału badanego, tak jak to pokazano na rys. 5. W praktyce jednak, przetworniki

prostokątne wykorzystywane są głównie w głowicach kątowych fal poprzecznych, gdzie wiązka ultradźwiękowa ulega załamaniu i transformacji na granicy klina głowicy i materiału badanego. Sytuacja taka znacznie komplikuje wyznaczanie parametrów wiązki w materiale badanym i wymaga dokładniejszego przeanalizowania.

Na rys. 6 pokazano schematyczny przekrój wiązki głowicy kątovej fal poprzecznych w płaszczyźnie padania. Widać, że wskutek zjawiska załamania zmienia się nie tylko kierunek osi wiązki lecz także jej szerokość oraz kąt rozbieżności w polu dalekim. Przybliżone obliczenia profilu wiązki w materiale badanym są możliwe w ramach modelu przetwornika wirtualnego, w którym rzeczywisty przetwornik o długości boku b zastępuje się przetwornikiem wirtualnym znajdującym się na przedłużeniu osi wiązki (patrz rys. 6) i wprowadzającym fale bezpośrednio do materiału badanego (materiał badany zastępuje wirtualnie materiał klina).



Rys. 6. Schematyczny obraz wiązki ultradźwiękowej głowicy kątovej fal poprzecznych z przetwornikiem prostokątnym o bokach a , b .

Długość boku b' przetwornika wirtualnego wynika bezpośrednio z geometrii załamania wiązki w polu bliskim (patrz rys. 6) i dana jest wzorem:

$$b' = b \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \quad (14)$$

Długość boku przetwornika wirtualnego w kierunku prostopadłym do płaszczyzny padania jest taka sama jak przetwornika rzeczywistego, czyli wynosi a .

Odległość środka przetwornika wirtualnego od środka głowicy – s' jest dobrana tak aby uwzględnić różnicę prędkości fali w materiale klina i materiale badanym.

$$s' = s \frac{V_{kl}}{V_m} \quad (15)$$

gdzie: V_{kl} – prędkość fali podłużnej w materiale klina,
 V_m – prędkość fali poprzecznej w materiale badanym,

Przetwornik wirtualny o wymiarach boków a i b' wprowadza fale ultradźwiękowe bezpośrednio do materiału badanego tak więc do obliczenia parametrów jego wiązki można wykorzystać wzory (9) i (12). W szczególności współczynnik n we wzorze (9) na długość pola bliskiego będzie miał teraz postać:

$$n = \frac{b'}{a} = \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \frac{b}{a} \quad (16)$$

Przypomnijmy tutaj, że mając kąt załamania głowicy - β możemy łatwo wyliczyć kąt padania fali na granicę klin–materiał - α korzystając z prawa Sneliusa:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{V_{kl}}{V_m} \quad (17)$$

Wzory obliczeniowe na kąty rozbieżności wiązki w płaszczyźnie padania (patrz rys. 6) będą miały postać:

$$\begin{aligned} \sin(\psi_{-3dB}) &= 0,44 \frac{\lambda}{b'} = 0,44 \frac{\lambda \cos\alpha}{b \cos\beta} \\ \sin(\psi_{-6dB}) &= 0,60 \frac{\lambda}{b'} = 0,60 \frac{\lambda \cos\alpha}{b \cos\beta} \\ \sin(\psi_{-20dB}) &= 0,91 \frac{\lambda}{b'} = 0,91 \frac{\lambda \cos\alpha}{b \cos\beta} \end{aligned} \quad (17)$$

Z kolei analogiczne wzory na kąty rozbieżności wiązki w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny padania przyjmą postać:

$$\begin{aligned} \sin(\phi_{-3dB}) &= 0,44 \frac{\lambda}{a} \\ \sin(\phi_{-6dB}) &= 0,60 \frac{\lambda}{a} \\ \sin(\phi_{-20dB}) &= 0,91 \frac{\lambda}{a} \end{aligned} \quad (18)$$

Ponieważ przybliżenie przetwornika wirtualnego nie uwzględnia zmian profilu wiązki wynikających ze zmiennej wartości współczynnika transmisji fali na granicy klin–materiał w funkcji kąta padania wyprowadzone wzory (17) będą tym dokładniejsze im mniejszy jest poszukiwany kąt rozbieżności wiązki. Wynika to z faktu, że dla małej różnicy kątów skrajnych promieni wiązki różnice ich współczynników transmisji również będą pomijalnie małe, o ile tylko kąt klina głowicy nie znajduje się zbyt blisko kąta krytycznego.

Przedstawione powyżej rozwiązania dają użyteczne i stosunkowo proste narzędzia do przybliżonych obliczeń pola ultradźwiękowego wytwarzanego przez typowe głowice ultradźwiękowe. Pomimo tego, że dotychczasowe rozważania dotyczyły jedynie pola ciśnienia akustycznego wytwarzanego przez głowicę nadawczą mają one bezpośrednio zastosowanie także do modelowania pola czułości analogicznej głowicy odbiorczej. Ten niezwykle użyteczny wniosek wynika z twierdzenia o wzajemności (*reciprocity theorem*) udowodnionego w ramach liniowej teorii sprężystości. Oznacza to, że wyznaczone powyżej profile „nadawcze” wiązki ultradźwiękowej są także jej profilami „odbiorczymi”. Idąc dalej widzimy, że mając zarówno profil nadawczy jak i odbiorczy głowicy ultradźwiękowej możemy wyznaczyć jej efektywny profil czułości na wykrywanie nieciągłości materiału. Profil czułości nadawczo-odbiorczej głowicy jest iloczynem jej profilu nadawczego i odbiorczego. Prowadzi do wniosku, że wyznaczone powyżej profile ciśnienia akustycznego wiązki nadawczej można traktować jak profile czułości nadawczo-odbiorczej głowicy przy podwojonej wartości spadku decybelowego. Przykładowo, wiązka wyznaczona dla 3 dB spadku ciśnienia akustycznego jest jednocześnie wiązką czułości nadawczo-odbiorczej dla 6 dB spadku echa wady punktowej, zaś wiązka wyznaczona dla 6 dB spadku ciśnienia jest jednocześnie wiązką czułości nadawczo-odbiorczej dla 12 dB spadku echa wady. Wyznaczone w ten sposób profile czułości głowic odnoszą się do małych wad odbijających fale ultradźwiękowe równomiernie we wszystkich kierunkach, np. małych otworów płaskodennych czy kulistych pęcherzy.

Modelowanie propagacji fal ultradźwiękowych przy wykorzystaniu profili wiązki ultradźwiękowej stanowi użyteczne narzędzie przy planowaniu wielu technik badań ultradźwiękowych. W przypadku automatycznych badań złączy spawanych pozwala np.

podzielić objętość spoiny na kilka stref badania pokrywanych wiązkami ultradźwiękowymi różnych głowic. Obliczenie i narysowanie poszczególnych wiązek na tle przekroju spoiny pozwala na ustalenie optymalnych położenia oraz parametrów (kąta załamania, wymiarów przetwornika) głowic ultradźwiękowych stosowanych do badania. Podobnie, w przypadku badań techniką tandem (patrz rys. 2), wyznaczenie profili wiązki stosowanych głowic pozwala określić nie tylko wymagane odległości między głowicami lecz także strefy czułości poszczególnych skanów oraz liczbę skanów wymaganych do przebadania całej grubości materiału.

W przypadku zautomatyzowanych badań ultradźwiękowych blach, rur czy prętów obliczanie profilu wiązki pozwala na optymalne określenie rastru skanowania tak aby cała objętość materiału została przebadana z odpowiednią czułością przy minimalnym czasie skanowania. Należy także przypomnieć, że obliczenia profilu wiązki ultradźwiękowej stanowią podstawę systemu oceny wielkości wad metodą DGS.

Niezależnie od dużego potencjału aplikacyjnego oraz wielkiego znaczenia historycznego modelowania propagacji fal ultradźwiękowych za pomocą profili wiązki metoda ta ma również istotne ograniczenia. Łatwo zauważyć, że nie daje ona dokładnych wartości ciśnienia akustycznego w poszczególnych punktach pola ultradźwiękowego a jedynie jego ogólny kształt. Może to mieć istotne znaczenie np. w badaniach prowadzonych przy użyciu głowic wąskopasmowych z uwagi na duże fluktuacje ciśnienia akustycznego w polu bliskim. Jednak nie ten problem stanowi główne ograniczenie rozpatrywanego modelu z punktu widzenia nowych zastosowań metody ultradźwiękowej.

Podstawowy problem wynika z faktu, że coraz więcej odpowiedzialnych wyrobów współczesnej techniki posiada złożony kształt geometryczny (osie, wały, szyny kolejowe) lub jest wykonana z materiałów niejednorodnych lub anizotropowych (kompozyty, spoiny austenityczne). Wiele produktów ma jeszcze bardziej złożone a nawet indywidualnie projektowane kształty, jak np. endoprotezy czy wyroby z drukarek 3D.

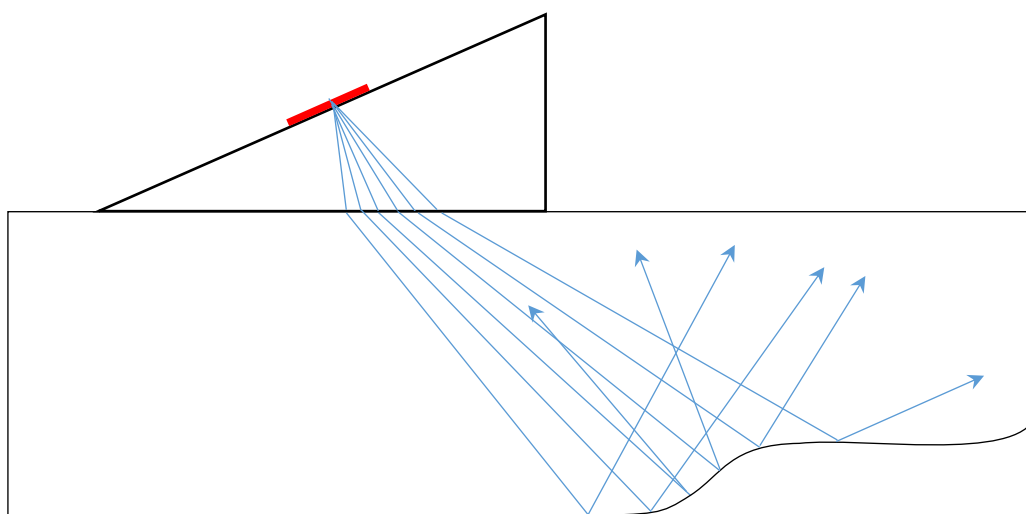
W takich przypadkach klasyczne wzory na parametry wiązki ultradźwiękowej nie mają zastosowania ponieważ profil wiązki deformuje się w wyniku odbić od zakrzywionych powierzchni badanego elementu lub z uwagi na właściwości samego materiału. Sytuacja komplikuje się dodatkowo w przypadkach, gdy fala ultradźwiękowa wprowadzana jest do takiego obiektu badania w kierunku nie leżącym w płaszczyźnie jego symetrii i odbija się w kierunku nie leżącym w pierwotnej płaszczyźnie padania. W wyniku jednego lub kilku takich odbić tor fali w obiekcie badania staje się istotnie trójwymiarowy i nie można analizować go na płaskiej kartce papieru. Praktycznym przykładem takiej sytuacji jest eksploatacyjne badanie głowki szyny głowicą kątową skierowaną pod pewnym kątem do osi szyny. Aby zamodelować propagację fali ultradźwiękowej w takim przypadku konieczny jest bardziej zaawansowany model teoretyczny uwzględniający rzeczywisty kształt obiektu badania oraz możliwość wprowadzania fal w dowolnym kierunku. W niektórych przypadkach (np. kompozyty, spoiny austenityczne) trzeba z kolei uwzględnić anizotropowe właściwości badanego materiału. Już z tych wstępnie zarysowanych wymagań wynika, że model obliczeniowy adekwatny do opisu tych sytuacji musi bazować na oprogramowaniu komputerowym umożliwiającym obsługę i wizualizację geometrii 3D.

4. METODA RAY TRACING

Metodyka obliczeń pola ultradźwiękowego nazywana w literaturze [6-9] techniką *ray tracing* (czyli techniką śledzenia promieni), w znacznym stopniu realizuje postawione wyżej postulaty. Podstawowa idea tej metody jest pewnym rozwinięciem i udoskonaleniem koncepcji wiązki ultradźwiękowej gdzie także operuje się pojęciami promienia centralnego oraz promieni bocznych ograniczających szerokość wiązki. Metoda *ray tracing* zakłada, że całą objętość wiązki ultradźwiękowej można zamodelować i przedstawić graficznie za pomocą pęku promieni wychodzących ze środka przetwornika nadawczego. Promieni tych

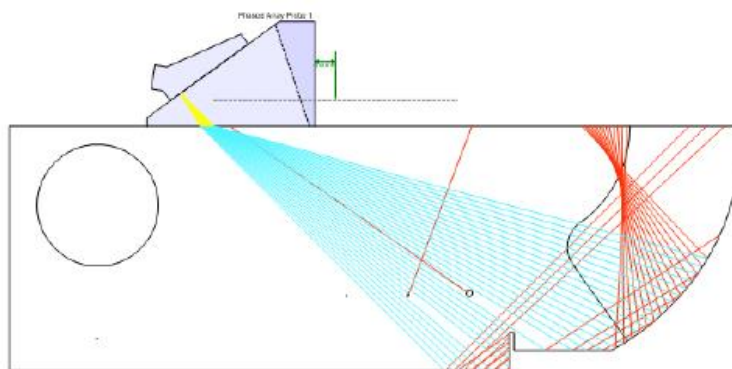
może być bardzo wiele (kilkadziesiąt lub nawet kilkaset) zaś ich początkowy rozkład kątowy można wyznaczyć na podstawie znanych rozkładów ciśnienia w polu dalekim takich jak wzory (11) lub (12).

Dalsze modelowanie propagacji wiązki polega na indywidualnym obliczaniu i śledzeniu trajektorii każdego promienia wygenerowanego przez źródło. Natrafiając na granicę klina i materiału badanego promień taki ulega załamaniu zgodnie z prawem Sneliusa i rozchodzi się dalej w materiale badanym do momentu gdy napotka granicę materiału lub nieciągłość wewnętrzną. W takim przypadku odbija się od niej zgodnie z prawami optyki geometrycznej (kąta padania równa się kątowi odbicia) i kontynuuje swoją trajektorię do następnego odbicia. W ten sposób program komputerowy wyznacza indywidualną, trójwymiarową trajektorię każdego wygenerowanego promienia, uwzględniając z góry zadaną liczbę kolejnych odbić. Powyższy sposób modelowania propagacji wiązki ultradźwiękowej zilustrowano graficznie na rys. 7.



Rys. 7. Schemat modelowania wiązki ultradźwiękowej za pomocą pęku promieni wychodzących z przetwornika nadawczego i propagujących się w badanym materiale.

Dzięki indywidualnemu śledzeniu poszczególnych promieni możliwe jest modelowanie propagacji wiązki po odbiciu od zakrzywionych powierzchni obiektu lub nieciągłości wewnątrz materiału. Poprzez graficzne zobrazowanie trajektorii wielu promieni uzyskuje się ogólny obraz propagacji wiązki, w którym gęstość promieni odzwierciedla ciśnienie akustyczne fali ultradźwiękowej w danym obszarze. Można zidentyfikować różne kierunki odbić poszczególnych fragmentów wiązki od zakrzywionych powierzchni, w szczególności np. to, czy określona wada da odbicie powrotne w kierunku głowicy nadawczej pozwalające na jej wykrycie metodą echa. W przypadku złożonych obiektów trójwymiarowych i wielokrotnych odbić analiza taka jest praktycznie niemożliwa do przeprowadzenia bez programu symulacyjnego o funkcjonalności CAD 3D. Program taki umożliwia nie tylko obliczanie trójwymiarowych trajektorii promieni lecz także obrazowanie wyników takich obliczeń w różnych rzutach, przekrojach, kolorach czy perspektywach. Pozwala to specjalistom badań ultradźwiękowych na lepsze zrozumienie wyników symulacji oraz interaktywne modyfikowanie jej parametrów w celu optymalizacji techniki badania. Przykładowy wynik modelowania propagacji wiązki ultradźwiękowej we wzorcu V1 uzyskany przy wykorzystaniu programu *Beam Tool* [10] pokazano na rys. 8. Dla zachowania przejrzystości rysunku symulację zakończono przy drugim odbiciu jednak program umożliwia jej prowadzenie dla większej liczby odbić.

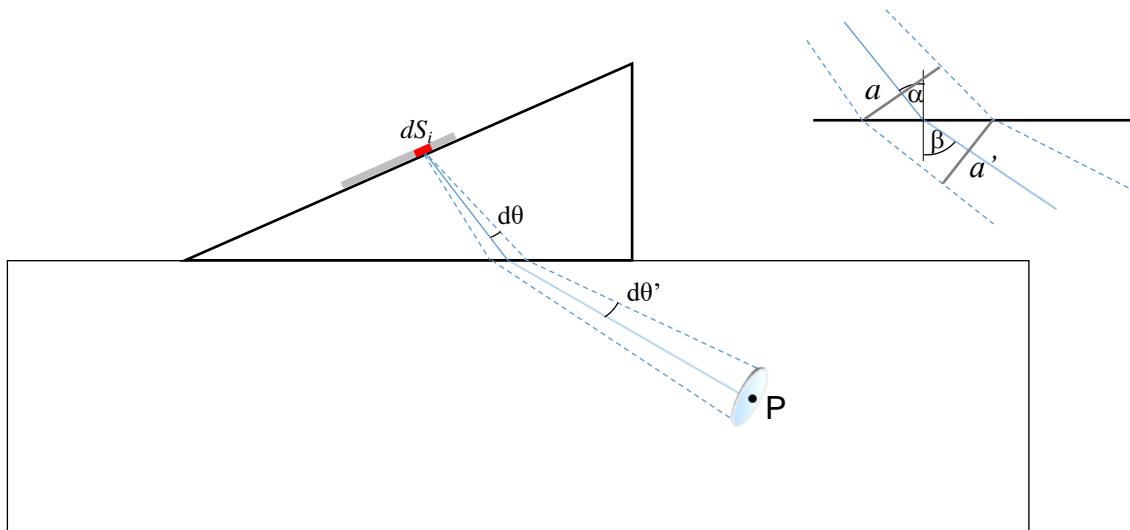


Rys. 8. Wynik modelowania propagacji wiązki ultradźwiękowej głowicy kątowej we wzorcu VI uzyskany za pomocą programu Beam Tool. Kolor zielony oznacza promienie wchodzące z klina głowicy do materiału, kolor czerwony promienie po jednokrotnym odbiciu od powierzchni wzorca.

Modelowanie propagacji wiązki za pomocą pęku promieni wychodzących ze środka przetwornika daje ogólny obraz propagacji fal ultradźwiękowych w badanym materiale w dalszych odległościach od głowicy przy założeniu, że krzywizny powierzchni odbijających obiektu są relatywnie małe. Chodzi o to aby fala ultradźwiękowa mogła być rozpatrywana jako fala płaska podczas kolejnych odbić, transformacji czy załamień. Tylko wówczas do wyznaczania trajektorii promieni można stosować proste prawa optyki geometrycznej. W przypadku nieciągłości o rozmiarach porównywalnych lub mniejszych niż długość fali symulacja techniką *ray tracing* nie daje prawidłowych rezultatów ponieważ oddziaływanie fali ultradźwiękowej z takimi nieciągłościami nie będzie miało charakteru kierunkowego odbicia lecz rozpraszania dyfrakcyjnego we wszystkich kierunkach. Dobry przykład takiego problemu widać na symulacji pokazanej na rys. 8 gdzie dwa małe otwory we wzorcu V1 dały silne kierunkowe odbicia w przypadkowych kierunkach, co zupełnie nie odzwierciedla rzeczywistej sytuacji fizycznej.

Ważnym rozwinięciem i udoskonaleniem klasycznej metody *ray tracing* jest metoda *pencil tracing* wprowadzona przez Deshampa [8] dla fal elektromagnetycznych i zaadaptowana później dla fal ultradźwiękowych [9]. Polega ona na śledzeniu trajektorii nie pojedynczych promieni ale całych stożków promieni (tzw. ołówków) składających się z promienia centralnego oraz grupy promieni przyosiowych propagujących się pod bardzo małym kątem $d\theta$ względem promienia centralnego (patrz rys. 9). W metodzie tej zakłada się, że energia ultradźwiękowa wypromieniowana w wirtualny stożek z elementarnego źródła punkowego na powierzchni przetwornika cały czas propaguje się w obrębie tego stożka nie wychodząc poza jego granice. Na granicach ośrodków propagacji (np. klina i materiału badanego), promienie stożka ulegają załamaniu zaś jego przekrój ulega deformacji (staje się elipsą). Zmiany przekroju stożka wskutek zjawiska załamania lub transformacji można obliczyć metodami geometrycznymi wychodząc z prawa Snelliusa.

Metodykę „metody ołówków” rozpatrzmy szczegółowo na prostym ale praktycznie ważnym przykładzie obliczania pola ultradźwiękowego głowicy kątowej z klinem załamującym (patrz rys. 9). W pierwszym rzędzie przetwornik głowicy dzielimy na elementarne źródła punkowe o bardzo małej powierzchni dS i rozpatrujemy przykładowy stożek promieni wychodzący z takiego źródła i dochodzący do punktu P w badanym materiale.



Rys. 9. Schemat propagacji stożka promieni pomiędzy elementarnym źródłem punktowym na powierzchni przetwornika a punktem P w badanym materiale.

Propagując się w materiale kłina wirtualny stożek o przekroju kołowym stopniowo zwiększa swoją średnicę, która po dojściu do granicy materiału badanego osiąga wartość a równą:

$$a = 2l_k d\theta \quad (19)$$

gdzie l_k – droga promienia centralnego od źródła punkowego na powierzchni przetwornika do granicy między kłinem a materiałem badanym.

W wyniku załamania promieni na granicy ośrodków stożek ulega deformacji tak, że jego przekrój staje się elipsą wskutek zmniejszenia swojej szerokości w płaszczyźnie padania (patrz rys. 9). Nową średnicę załamanego stożka – a' możemy obliczyć ze wzoru:

$$a' = \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} a \quad (20)$$

gdzie α oraz β oznaczają odpowiednio kąt padania i załamania promienia centralnego.

Wskutek załamania zmienia się również kąt rozbieżności stożka w płaszczyźnie padania. Odpowiedni wzór na kąt rozbieżności stożka załamanego $d\theta'$ ma postać:

$$d\theta' = \frac{V_m \cos\alpha}{V_k \cos\beta} d\theta \quad (21)$$

gdzie V_k – prędkość fali w materiale kłina, V_m – prędkość fali w materiale badanym. Kąt rozbieżności stożka w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny padania także zmienia się i wynosi $d\theta'' = \sin\beta/\sin\alpha d\theta = V_m/V_k d\theta$.

Znając rozmiary początkowe oraz kąty rozbieżności stożka załamanego możemy obliczyć jego rozmiary (b i b') oraz pole przekroju S_p w docelowym punkcie pola P.

$$S_p = \frac{\pi}{4} bb' = \pi \left(l_k + \frac{V_m}{V_k} l_m \right) d\theta \left(\frac{\cos\beta}{\cos\alpha} l_k + \frac{V_m \cos\alpha}{V_k \cos\beta} l_m \right) d\theta \quad (22)$$

Wzrost pola przekroju stożka promieni S_p oznacza spadek energii propagującej się fali ultradźwiękowej na jednostkę powierzchni proporcjonalnie do $1/S_p$. Ponieważ energia

niesiona przez falę jest proporcjonalna do kwadratu ciśnienia akustycznego fali to odpowiadający jej spadek ciśnienia akustycznego fali będzie proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z $1/S_P$.

$$p_P \sim \frac{1}{\sqrt{S_P}} \sim \frac{1}{\sqrt{\left(l_k + \frac{v_m}{v_k} l_m\right) \left(\frac{\cos\beta}{\cos\alpha} l_k + \frac{v_m \cos\alpha}{v_k \cos\beta} l_m\right)}} \quad (23)$$

Wyrażenie to jest bezpośrednim odpowiednikiem czynnika $1/r$ występującego w całkowym wzorze Rayleigha (7) dla ośrodka jednorodnego i odzwierciedla spadek ciśnienia akustycznego fali cząstkowej powodowany rozbieżnością w przypadku, gdy występuje załamanie na granicy dwóch ośrodków.

Jednak załamanie fali ultradźwiękowej na granicy ośrodków powoduje dodatkowe osłabienie fali przechodzącej wskutek częściowego odbicia. Tak więc aby prawidłowo obliczyć ciśnienie fali cząstkowej w punkcie P należy uwzględnić współczynnik transmisji fali $T(\alpha)$ na granicy ośrodków. Współczynnik ten zależy od kąta padania oraz właściwości obu ośrodków.

$$p_P \sim \frac{T(\alpha)}{\sqrt{\left(l_k + \frac{v_m}{v_k} l_m\right) \left(\frac{\cos\beta}{\cos\alpha} l_k + \frac{v_m \cos\alpha}{v_k \cos\beta} l_m\right)}} \quad (24)$$

Wyprowadzone powyżej wzory dotyczą jedynie amplitudy ciśnienia akustycznego fali cząstkowej w punkcie P , jednak w celu pełnego scharakteryzowania tej wielkości fizycznej musimy oprócz amplitudy obliczyć także jej fazę. Fazę fali cząstkowej w punkcie P obliczamy jako drogę falową promienia centralnego z punktu wyjścia na powierzchni przetwornika do punktu P .

$$\varphi(P) = k_k l_k + k_m l_m \quad (25)$$

gdzie: $k_k = 2\pi/\lambda_k$ – liczba falowa w materiale klina,
 $k_m = 2\pi/\lambda_m$ – liczba falowa w materiale badanym,
 λ_k, λ_m – długości fali ultradźwiękowej w materiale klina oraz materiale badanym,
 l_k, l_m – drogi fali ultradźwiękowej w materiale klina oraz materiale badanym,

W ten sposób obliczyliśmy elementarny przyczynek do ciśnienia fali ultradźwiękowej - p_i pochodzący od pojedynczego źródła punktowego dS_i na powierzchni przetwornika. Odpowiedni wzór końcowy uwzględniający zarówno jego amplitudę jak i fazę ma postać:

$$p_i = \frac{p_0 dS_i}{\lambda_k} \frac{T(\alpha) e^{-i(k_k l_k + k_m l_m)}}{\sqrt{\left(l_k + \frac{v_m}{v_k} l_m\right) \left(\frac{\cos\beta}{\cos\alpha} l_k + \frac{v_m \cos\alpha}{v_k \cos\beta} l_m\right)}} \quad (26)$$

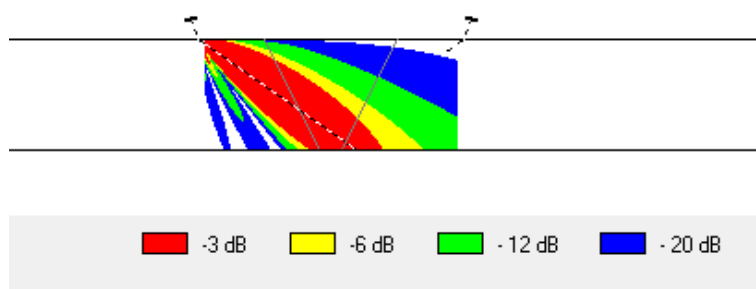
Postępując zgodnie z zasadą Huygensa musimy dokonać podobnych obliczeń dla wszystkich elementarnych źródeł punktowych na powierzchni przetwornika i zsumować wektorowo (tj. uwzględniając amplitudę i fazę) wyliczone ciśnienia cząstkowe. W ten sposób uzyskujemy poszukiwaną wartość ciśnienia akustycznego wytwarzanego przez cały przetwornik w punkcie P .

$$p(P) = \sum_{i=1}^N p_i \quad (27)$$

Liczba elementarnych źródeł punktowych, na które należy podzielić przetwornik aby uzyskać odpowiednio dokładne wyniki obliczeń numerycznych zależy od rozmiarów przetwornika oraz długości fali w materiale klina. Generalnie, przyjmuje się, że jedno źródło punktowe powinno przypadać na pół długości fali. Przykładowo dla przetwornika o wymiarach 10 x 10 mm i częstotliwości drgań 4 MHz oraz klina wykonanego z materiału o

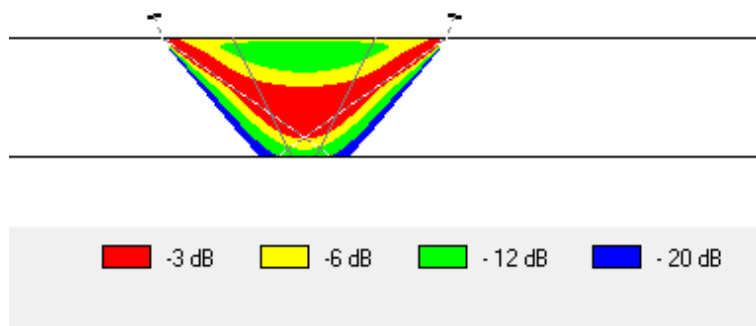
prędkości fali 2,7 mm/us przetwornik należy podzielić na 15x15 czyli łącznie $N=225$ źródeł punktowych. Widać stąd, że ilość obliczeń jaką należy wykonać aby wyznaczyć wartość ciśnienia akustycznego w jednym tylko punkcie pola ultradźwiękowego jest całkiem znacząca. Dla zobrazowania rozkładu pola ultradźwiękowego w typowym obszarze badania o rozmiarach rzędu kilkudziesięciu mm trzeba wykonać kilkaset lub nawet kilku tysięcy takich obliczeń. Okazuje się, że dla współczesnych komputerów klasy PC jest to zadanie możliwe do wykonania w rozsądnym czasie rzędu kilkunastu, kilkudziesięciu sekund.

Na rys. 10 pokazano przykładowy rozkład pola ultradźwiękowego głowicy kątowej fal podłużnych wyliczony przy wykorzystaniu specjalnego programu symulacyjnego do planowania badań TOFD firmy NDT SOFT [11]. Program oparty jest na powyżej opisanym algorytmie obliczeniowym i umożliwia obliczenia rozkładów ciśnienia akustycznego głowic TOFD w przekroju podłużnym oraz poprzecznym. Należy podkreślić, że niezależnie od tego iż wyniki obliczeń prezentowane są jedynie w przekrojach dwuwymiarowych, same obliczenia prowadzone są w pełnym trybie trójwymiarowym i reprezentują rzeczywiste rozkłady pól ultradźwiękowych głowic.



Rys. 10. Rozkład pola ultradźwiękowego wytworzonego w stali przez głowicę TOFD o średnicy przetwornika $D=3$ mm, częstotliwości $f=10$ MHz oraz kącie załamania $\beta=55^\circ$.

Oprócz obliczania rozkładów pola ultradźwiękowego głowic program posiada funkcjonalność obliczania efektywnych rozkładów czułości badania TOFD, uwzględniającą teoretyczne rozkłady amplitudy fal dyfrakcyjnych ugiętych na górnej oraz dolnej krawędzi szczeliny [12-13]. Dzięki temu można wykorzystać go do planowania parametrów badania TOFD tak aby zapewnić pokrycie całego przekroju spoiny wraz z przylegającymi strefami wpływu ciepła. Jest to szczególnie istotne przy badaniach grubych złączy spawanych, w których trzeba zaplanować 2 - 3 skany TOFD pokrywające różne strefy grubości spoiny.



Rys. 11. Przykładowy rozkład czułości układu głowic TOFD na fale dyfrakcyjne ugięte na dolnej krawędzi szczeliny.

Modelowanie propagacji fal ultradźwiękowych metodą *ray tracing* umożliwia skuteczne analizowanie i planowanie zdecydowanej większości współczesnych badań ultradźwiękowych włączając w to badania obiektów o złożonej geometrii oraz obiektów wykonanych z materiałów anizotropowych (np. spoin austenitycznych). Nawet badania metodą TOFD wykorzystujące fale dyfrakcyjne mogą być analizowane z wystarczającą dokładnością przy dodatkowym uwzględnieniu wzorów teoretycznych wyprowadzonych metodami analitycznymi.

Należy jednak podkreślić, że metodyka *ray tracing* nie jest całkowicie ścisła z fizycznego punktu widzenia i w niektórych przypadkach jej zastosowanie nie prowadzi do uzyskania zadowalających rezultatów. Przykładem tego są wspomniane już oddziaływania fal ultradźwiękowych z nieciągłościami o rozmiarach porównywalnych lub mniejszych od długości fali. Podobnie, nie zostanie poprawnie zamodelowane oddziaływanie fali ultradźwiękowej z powierzchniami wad o nierównej, chropowatej powierzchni lub też z powierzchniami rowkowanymi lub gwintowanymi, których promienie krzywizny są porównywalne lub mniejsze od długości fali.

Innym rodzajem badań, dla których metodyka *ray tracing* nie daje poprawnych przewidywań są badania prowadzone przy wykorzystaniu fal podpowierzchniowych propagujących się bezpośrednio pod powierzchnią elementu. Metoda promieni nie pozwala na symulowanie propagacji tego rodzaju fal, ponieważ każdy załamany promień musi propagować się pod jakimś, choćby minimalnym, kątem w stosunku do powierzchni. Tym samym nie można zasymulować np. fali poprzecznej odpromieniowanej od powierzchni, wzdłuż której propaguje się fala podpowierzchniowa podłużna, ani też fal podłużnych obiegających otwory cylindryczne [14].

5. METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Metoda elementów skończonych, w skrócie MES, jest obecnie jednym z podstawowych narzędzi modelowania numerycznego we współczesnej nauce i technice. Jest wykorzystywana do rozwiązywania wielu złożonych zagadnień fizyki i mechaniki a także w projektowaniu konstrukcji inżynierskich. Jednak jej zastosowanie do modelowania propagacji fal ultradźwiękowych w typowych obiektach będących przedmiotem badań nieniszczących natrafia na istotne trudności metodologiczne oraz ograniczenia praktyczne związane z bardzo dużymi wymaganiami odnośnie wydajności systemów komputerowych.

Z drugiej strony metoda MES pozwala w najpełniejszy i najbardziej dokładny sposób modelować propagację fal ultradźwiękowych w badanych obiektach, uwzględniając oddziaływania z nieciągłościami mniejszymi niż długość fali, dyfrakcję fal na krawędziach szczelin czy też propagację fal podpowierzchniowych. Aby lepiej zrozumieć zarówno ograniczenia jak też potencjał zastosowania tej metody należy dokładniej przeanalizować podstawowe aspekty implementacji metody MES do analizowania zagadnień ultradźwiękowych.

Istotą metody elementów skończonych jest przybliżone rozwiązywanie równań różniczkowych opisujących określony proces fizyczny (w naszym przypadku równania falowego opisującego ruch ośrodka sprężystego) poprzez zastąpienie ich wielowymiarowym układem równań liniowych opisujących ruch węzłów (stopni swobody) siatki elementów skończonych, na które dzielony jest obiekt. Pierwszym ważnym aspektem rozwiązania MES jest zatem podział analizowanego obiektu na elementy skończone o odpowiednim kształcie i rozmiarach. Już w tym miejscu pojawia się pierwszy poważny problem w zastosowaniu MES do opisu propagacji fal ultradźwiękowych. Aby rozwiązanie MES było wystarczająco dokładne rozmiary elementu skończonego muszą być znacznie mniejsze (przynajmniej 10-15 razy) zarówno od wymiarów najmniejszych rozpatrywanych nieciągłości jak też od długości stosowanej fali ultradźwiękowej. Biorąc pod uwagę, że długości fal ultradźwiękowych

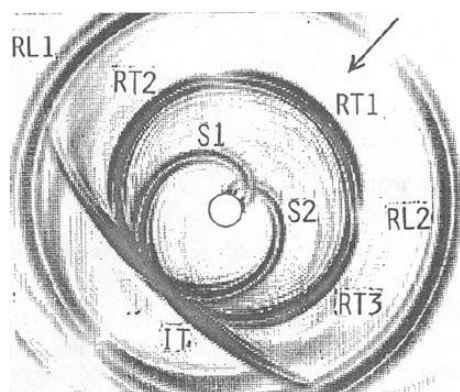
stosowanych w badaniach nieniszczących są rzędu 1 mm, rozmiary elementów skończonych powinny być rzędu dziesiątej części mm. Uwzględniając z kolei fakt, że w typowych badaniach fale propagują się w obiektach trójwymiarowych o rozmiarach rzędu kilkuset mm widzimy, że siatki MES muszą mieć rozmiary rzędu 1000x1000x1000 elementów a nawet znacznie więcej. Nakłada to duże wymagania na pamięć operacyjną systemów komputerowych, zdecydowanie wykraczające poza możliwości typowych komputerów klasy PC.

Należy także zauważyć, że w typowych obliczeniach mechanicznych i inżynierskich wymiary elementów skończonych zdeterminowane są głównie kształtem analizowanych konstrukcji i mogą mieć znacznie większe wartości bez istotnego uszczerbku dla dokładności obliczeń. Dodatkowo, wiele konstrukcji inżynierskich ma charakter dwuwymiarowy lub kratowy co powoduje dalsze zmniejszenie liczby stopni swobody i redukuje liczbę wymaganych elementów skończonych.

Kolejnym poważnym utrudnieniem w stosowaniu MES do modelowania badań ultradźwiękowych jest fakt, że rozchodzenie się impulsu ultradźwiękowego ma charakter dynamiczny i zamodelowanie jego propagacji w obiekcie badania wymaga wielokrotnego (zazwyczaj kilkusetkrotnego) rozwiązania bardzo dużego układu równań. To z kolei wiąże się z dużymi wymaganiami odnośnie szybkości obliczeniowej stosowanego komputera, znacznie większymi niż w przypadku statycznych zastosowań metody MES.

Podsumowując, zastosowanie metody MES do symulacji propagacji fal ultradźwiękowych w badaniach nieniszczących jest możliwe ale wymaga dużych mocy obliczeniowych komputera możliwych do uzyskania jedynie na dużych maszynach klasy *mainframe*. Nakłady pracy na przygotowanie stosownych rozwiązań oraz koszty wykonania obliczeń nie znajdują uzasadnienia przy rutynowym planowaniu badań ultradźwiękowych w firmach NDT. Z drugiej strony wykorzystanie symulacji MES daje możliwości szczegółowego analizowania oddziaływania fal ultradźwiękowych z mniejszymi nieciągłościami materiału a także pokazywania efektów fizycznych, które są pomijane w analizach przeprowadzonych innymi metodami. Stwarza to możliwości opracowywania nowych specjalistycznych technik badań wykorzystujących np. słabe fale dyfrakcyjne czy też fale powstające w wyniku transformacji.

Typowe zastosowania techniki MES omówimy na przykładach zaczerpniętych z pracy [14], omawiającej efekty dużego projektu badawczego zrealizowanego w Japonii w latach 90-tych. Na rys. 12 pokazano wynik symulacji MES oddziaływania fali poprzecznej, wygenerowanej przez typową głowicę T45° z równie typowym otworem cylindrycznym spotykanym w wielu wzorcach i próbkach odniesienia.



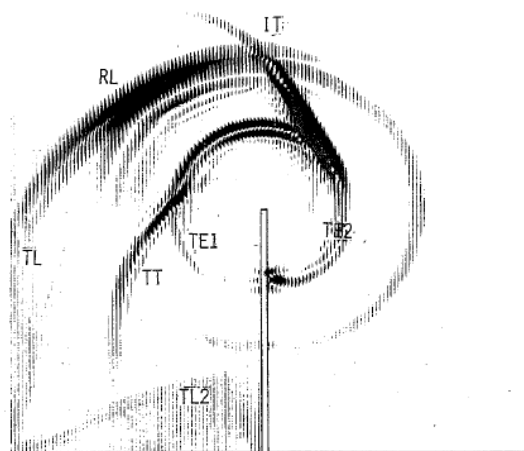
Rys. 12. Obraz oddziaływania poprzecznej fali ultradźwiękowej z typowym otworem cylindrycznym uzyskany w wyniku symulacji MES.

Podstawowa analiza tego zagadnienia sprowadza się do stwierdzenia, że otwór odbija padające fale poprzeczne, z grubsza równomiernie we wszystkich kierunkach. Jednak obraz

uzyskany w wyniku symulacji MES wskazuje, że oddziaływanie to jest znacznie bardziej skomplikowane. Oprócz fali odbitej typu poprzecznego (listki RT1, RT2, RT3) widoczna jest stosunkowo silna fala typu podłużnego (listki RL1, RL2) powstająca w wyniku transformacji na powierzchni otworu.

Dodatkowo widoczne są dwie fale poprzeczne (S1, S2) powstające w wyniku odpromieniowania od powierzchni otworu propagującej się wokół niego fali powierzchniowej. Fale te dadzą w efekcie drugi impuls fali poprzecznej w kierunku głowicy nadawczej, który będzie opóźniony w stosunku do impulsu RT1 o czas obiegu fali powierzchniowej wokół otworu.

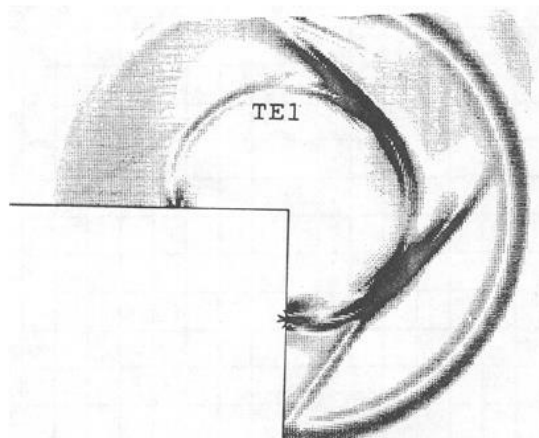
Na rys. 13 pokazany został wynik symulacji oddziaływania fali podłużnej $L60^\circ$ (IT) ze szczeliną wychodzącą od powierzchni badania. Wszystkie geometryczne modele propagacji fal ultradźwiękowych (łącznie z *ray tracing*) prowadzą do wniosku, że w strefie cienia za szczeliną nie powinny rozchodzić się żadne fale ultradźwiękowe. Jednak wynik



Rys. 13. Obraz oddziaływania podłużnej fali ultradźwiękowej z wierzchołkiem szczeliny uzyskany w wyniku symulacji MES.

symulacji MES wskazuje, że w strefie cienia propagują się dwie fale kuliste wychodzące z wierzchołka szczeliny, jedna typu L druga typu T. Wynik ten stanowi teoretyczne potwierdzenie istnienia wierzchołkowych fal dyfrakcyjnych wykorzystywanych w metodzie TOFD.

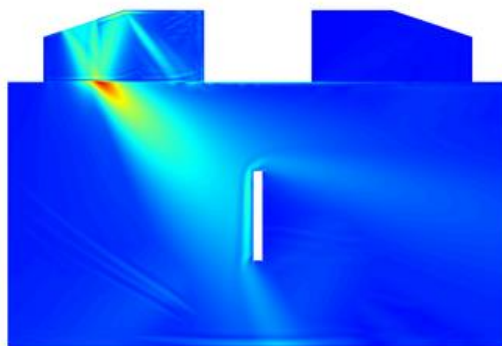
Kolejny ciekawy i pouczający wynik symulacji MES pokazano na rys. 14. W tym przypadku rozpatrywano oddziaływanie fali poprzecznej $T45^\circ$ padającej (z lewej strony) na prostokątne naroże.



Rys. 14. Obraz oddziaływania poprzecznej fali ultradźwiękowej z prostokątnym narożem uzyskany w wyniku symulacji MES.

Rysunek ilustruje rozkład fal ultradźwiękowych występujący bezpośrednio po minięciu naroża przez falę padającą. Oprócz silnej fali poprzecznej odbitej od poziomej powierzchni naroża występują dwie fale kuliste wychodzące od wierzchołka naroża, jedna (szybsza) typu L, druga (wolniejsza) typu T. Fala TE1 powracająca w kierunku głowicy nadawczej jest na tyle silna, że może dawać echo porównywalne do ewentualnych pęknięć w strefie naroża i powodować błędną interpretację wyników badania. Potwierdzenie występowania fal wierzchołkowych o charakterze dyfrakcyjnym jest ważnym wnioskiem wynikającym z tej i wielu innych symulacji MES.

Jeśli chodzi o komercyjne oprogramowanie do modelowania propagacji fal ultradźwiękowych metodą MES to jak już wspomniano powinno ono bazować na wykorzystaniu komputerów o dużej mocy obliczeniowej. W ostatnim czasie firma *Eclipse Scientific* udostępniła, w programie *Beam Tool 9* (który normalnie służy do wykonywania symulacji metodą *ray tracing* na komputerach klasy PC) specjalny interfejs do serwisu obliczeniowego „w chmurze” [15], który umożliwia przeprowadzanie pełnej symulacji fal propagacji ultradźwiękowych metodą elementów skończonych. Przykład wyniku takiej symulacji dla badania TOFD pokazano na rys. 15.



Rys. 15. Wynik symulacji pola ultradźwiękowego w badaniu TOFD uzyskany za pomocą usługi serwisu *OnScale* [15].

6. ZAKOŃCZENIE

W artykule przeprowadzono kompleksowy przegląd metod obliczeniowych stosowanych do modelowania propagacji fal ultradźwiękowych w obiektach przemysłowych. Omówiono zasady elementarnych obliczeń przedstawiane na kursach badań ultradźwiękowych, poprzez metody *ray tracing* i *pencil tracing* skończywszy na najbardziej zaawansowanej metodzie MES. Nawet najbardziej podstawowe obliczenia w formie wyznaczania trajektorii promienia centralnego czy profilu wiązki dają istotne informacje, znajdujące zastosowanie przy planowaniu i optymalizacji badań ultradźwiękowych. Obliczenia takie muszą być jednak prawidłowo wykonane i zinterpretowane. W tym kontekście, w rozdz. 3 przedstawiono kompleksowe zestawienie wzorów obliczeniowych mających ułatwić wyznaczanie profili wiązki ultradźwiękowej, zarówno w prostych badaniach głowicą normalną jak też w nieco bardziej skomplikowanych badaniach głowicami kątowymi, gdzie występuje załamanie fal ultradźwiękowych na granicy ośrodków.

Podstawowym celem artykułu było jednak przybliżenie specjalistom badań ultradźwiękowych nowoczesnych metod modelowania propagacji fal ultradźwiękowych metodami numerycznymi. Zastosowanie tych metod daje wiele potencjalnych korzyści przy planowaniu i analizowaniu wyników badań ultradźwiękowych. W szczególności pozwala kompleksowo modelować badania elementów o skomplikowanym kształcie (np. osie, wały, endoprotezy, szyny kolejowe), co trudno wykonać metodami elementarnymi, które ograniczone są do analizowania dwuwymiarowych przekrojów w płaszczyznach symetrii

badanego obiektu. Ważnym polem wykorzystania symulacji numerycznych jest także planowanie badań ultradźwiękowych techniką *phased array*, gdzie służą np. do opracowywania optymalnych praw opóźnień dla głowic nadawczych i odbiorczych. Również w przypadku bardziej konwencjonalnych zastosowań, takich jak zautomatyzowane badania złączy spawanych na rurociągach i zbiornikach, techniki modelowania numerycznego pozwalają na optymalizację układów głowic ultradźwiękowych czy parametrów badania TOFD zarówno pod kątem skuteczności w wykrywaniu wad jak też efektywności ekonomicznej badania (liczba wymaganych skanów, szybkość skanowania).

Niezależnie od ogromnego postępu jaki dokonuje się obecnie w oprogramowaniu do modelowania badań ultradźwiękowych należy podkreślić, że rola specjalistów UT w całym procesie przygotowania i analizy wyników badań wcale nie ulega zmniejszeniu, a wręcz przeciwnie, staje się trudniejsza i bardziej odpowiedzialna. Nowe narzędzia programowe dają szereg możliwości analitycznych ale jednocześnie wymagają zrozumienia zasad swojego działania, nauczania się obsługi a co najważniejsze umiejętności właściwego doboru odpowiedniego narzędzia w celu efektywnego rozwiązania postawionego problemu.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr POIR.04.01.01.-00-0011/17 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia BRIK.

LITERATURA

- [1] J. Krautkramer, H. Krautkramer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall.*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1966.
- [2] Z. Pawłowski, *Badania nieniszczące - Poradnik*, Wydawnictwo Ośrodek Doskonalenia Kadr SIMP, Warszawa 1984.
- [3] J. Obraz, *Ultradźwięki w technice pomiarowej.*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.
- [4] N.F. Declorcq, E. Lamkanfi, Study by means of liquid side acoustic barrier of the influence of leaky Rayleigh waves on bounded beam reflection., *Applied Physics Letters* 93(5) August 2008.
- [5] *Badania ultradźwiękowe. Kurs zaawansowany. Materiały pomocnicze do nauczania na kursach.*, DGZfP 1996.
- [6] A. Bergmann, T. Orth, T. Kerting, *Ray Tracing Software for the Layout of Ultrasonic Weld Seam Inspection.*, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH; Duisburg, EUROPIPE; Mülheim, Germany.
- [7] J.A. Johnson, N.M. Carlson, and D.M. Tow, Ray Trace Calculations of Ultrasonic Fields., *Res Nondestr Eval* (1991) 3:27-39.
- [8] N. Gengembre, Pencil method for ultrasonic beam computation., WCU 2003, Paris Sept. 7-10, 2003.
- [9] G.A. Deshamps, *Ray Techniques in Electromagnetics.*, IEEE, Vol. 60, No 9. Sept. 1972
- [10] www.eclipsescientific.com
- [11] www.ndtsoft.pl
- [12] J. Deputat, S. Mackiewicz, J. Szelażek, *Problemy i techniki nieniszczących badań materiałów. Wybrane wykłady – Dyfrakcja fal ultradźwiękowych na szczelinie*, Wydawnictwo Biuro Gamma, Warszawa 2007.
- [13] J.A. Ogilvy, J.A.G. Temple, Diffraction of elastic waves by cracks; application to time-of-flight inspection., *Ultrasonics*, November 1983.
- [14] K. Harumi and M.Uchida, Computer Simulation of Ultrasonics and Its Applications., *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 9, Nos. 2/3 1990.
- [15] www.onscale.com