

Tomasz Katz*, Sławomir Mackiewicz
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Przykłady komputerowych symulacji badań ultradźwiękowych przy wykorzystaniu programu SymUT

Examples of computer simulations of ultrasonic tests using the SymUT software

STRESZCZENIE

Symulacje komputerowe odgrywają coraz większą rolę w planowaniu, przygotowaniu oraz interpretacji badań ultradźwiękowych. W artykule opisano podstawowe założenia teoretyczne oraz funkcjonalności programu SymUT rozwijanego w pracowni badań nieniszczących IPPT PAN. W celu ilustracji możliwości programu pokazano proste przykłady jego zastosowania do obliczania rozkładów pola ultradźwiękowego głowic ultradźwiękowych oraz obwiedni echa wad modelowych. Opisano zasady wykorzystania programu do projektowania głowic ultradźwiękowych oraz przygotowania procedur badawczych.

Słowa kluczowe: badania ultradźwiękowe; defektoskopia ultradźwiękowa; wiązka ultradźwiękowa; wady materiałowe, symulacje badań ultradźwiękowych.

ABSTRACT

Computer simulations are playing an increasingly important role in planning, preparation and interpretation of ultrasonic testing. The article describes the basic theoretical assumptions and functionalities of the SymUT software developed in the non-destructive testing laboratory of IPPT PAN. In order to illustrate its capabilities, simple examples of its use for calculation of the ultrasonic field of ultrasonic probes as well as the echo envelopes from model defects are shown. The principles of using the program for designing of ultrasonic probes and preparing testing procedures are described.

Keywords: ultrasonic testing, ultrasonic flaw detection, ultrasonic beam, material defects, ultrasonic testing simulations, radar testing, electromagnetic testing.

1. Wstęp

Komputerowe symulacje badań ultradźwiękowych odgrywają coraz większą rolę w planowaniu, przygotowaniu oraz interpretacji badań nieniszczących prowadzonych na obiektach przemysłowych. W wielu przypadkach, zamiast wykonywać czasochłonne i kosztowne testy laboratoryjne na rzeczywistych elementach można wykonać wirtualne badania za pomocą oprogramowania komputerowego symulującego badania w stopniu wystarczającym do określonych zastosowań. Na rynku dostępne są komercyjne pakiety oprogramowania do symulacji badań ultradźwiękowych takie jak Beam Tool firmy Eclipse Scientific [1] czy CIVA firmy Extende [2].

Niezależnie od dużych możliwości i szerokiego spektrum zastosowań gotowych pakietów komercyjnych czasem pojawiają się specyficzne zastosowania badań ultradźwiękowych, w których ich funkcjonalności nie są wystarczające. Przykładem takiego zastosowania są ultradźwiękowe badania szyn w torze za pomocą nowego typu wagonów inspekcyjnych, które mają wykonywać badania szyn z prędkością do 120 km/h. Oznacza to, że skanowanie ultradźwiękowe musi być prowadzone z prędkością dochodzącą do 33 m/s. Przy tak dużej prędkości skanowania czas przejścia impulsu ultradźwiękowego od głowicy do potencjalnej wady (znajdującej się np. w stopce szyny) i z powrotem jest na tyle długi, że głowica przesuwająca się po powierzchni szyny zmieni w tym czasie

swoje położenie o kilka mm. Oznacza to, że do dokładnego zasymulowania takiego badania nie można stosować klasycznego, quasi statycznego modelu badania, który zakłada, że czas przejścia impulsu ultradźwiękowego jest na tyle krótki, że głowica w trakcie cyklu nadawczo-odbiorczego praktycznie stoi w miejscu. W rozpatrywanym przypadku konieczne jest zaimplementowanie nowego dynamicznego modelu badania, który uwzględnia jednoczesny ruch impulsu ultradźwiękowego i głowicy.

Drugim specyficznym aspektem badania ultradźwiękowego prowadzonego z dużą prędkością skanowania jest dolne ograniczenie kroku skanowania obiektu spowodowane ograniczeniem częstotliwości powtarzania systemu ultradźwiękowego. W przypadku badań szyn w torze górna granica częstotliwości powtarzania wynosi ok. 5 kHz co, przy prędkości badania 120 km/h, przekłada się na ograniczenie kroku skanowania (czyli odległości pomiędzy kolejnymi punktami wysłania impulsu przez głowicę) do wartości ok. 7 mm. Jest to wartość na tyle duża, że niektóre mniejsze wady mogą pozostać niewykryte, inne zaś zostać wykryte przy zmniejszonej amplitudzie echa. Należy podkreślić, że górne ograniczenie częstotliwości powtarzania do 5 kHz nie wynika tutaj z problemów aparaturowych lecz z samej istoty badań ultradźwiękowych impulsową metodą echa. Odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi impulsami nadawczymi musi być na tyle długi aby system zdążył w tym czasie zarejestrować wszystkie echa od potencjalnych wad. W przypadku badań szyn typową głowicą T45 czas przejścia impulsu ultradźwiękowego od przetwornika głowicy do stopki szyny i z powrotem wynosi $T = 160 - 170 \mu s$. Oznacza to, że

*Autor korespondencyjny.
E-mail: tkatz@ippt.pan.pl

częstotliwość powtarzania impulsów nie może być wyższa niż $1/T$ czyli w zaokrągleniu ok. 5 kHz.

Specyfika opisanych badań szyn spowodowała, że do ich symulacji, oprócz zastosowania oprogramowania komercyjnego, stworzono własny program symulacyjny SymUT RRD uwzględniający zarówno dynamiczny model badania ultradźwiękowego jak i ograniczenie częstotliwości powtarzania impulsów ultradźwiękowych.

W niniejszym artykule opisano założenia i podstawy teoretyczne programu jednak bez wchodzenia w zaawansowane formuły matematyczne i ich implementacje komputerowe. Te zagadnienia opisano szczegółowo w publikacjach [4,5]. Skoncentrowano się natomiast na pokazaniu możliwości wykorzystania programu w planowaniu i analizie standardowych badań ultradźwiękowych. W szczególności pokazano proste przykłady jego zastosowania do rozwiązania kilku typowych problemów pojawiających się podczas planowania i interpretacji badań ultradźwiękowych. Zaprezentowane przykłady dotyczą nie tylko specyficznego obszaru badań szyn kolejowych ale mają charakter na tyle uniwersalny, że mogą zainteresować szersze grono specjalistów badań ultradźwiękowych.

2. Podstawy teoretyczne programu SymUT

Oprogramowanie komputerowe do wspomagania badań ultradźwiękowych musi pozwalać specjalistom badań nieniszczących przewidywać/symulować rezultaty zastosowania określonych typów głowic, kierunków wprowadzania fal itp. do wykrywania określonych defektów w określonym obiekcie badań. Pierwszą i podstawową funkcjonalnością takiego oprogramowania musi być obliczanie pola ultradźwiękowego wytwarzanego w badanym materiale przez przetwornik głowicy ultradźwiękowej. Należy tutaj podkreślić, że dotyczy to nie tylko prostych, podręcznikowych przypadków głowicy normalnej przyłożonej do powierzchni jednorodnego materiału lecz także bardziej złożonych konfiguracji wprowadzania fal ultradźwiękowych stosowanych w badaniach nieniszczących. W szczególności należy uwzględnić głowice kątowe fal poprzecznych i podłużnych z przetwornikami w kształcie koła lub prostokąta, głowice normalne z liniami opóźniającymi a także głowice podwójne o różnych kątach załamania i kątach dachowych. Co więcej, nowoczesne głowice ultradźwiękowe mają z reguły stosunkowo szerokie pasmo częstotliwości (parametr BW) tak więc stosowany model musi być szerokopasmowy i uwzględniać fakt, że głowica wysyła nie tylko fale o częstotliwości nominalnej lecz całe spektrum częstotliwości.

Aby program symulacyjny był przydatny w praktyce NDT musi w sposób możliwie szybki i dokładny obliczać pole ultradźwiękowe dla wszystkich opisanych powyżej typów głowic. Jak wskazano w pracy [3] cel ten można zrealizować za pomocą różnych modeli teoretycznych charakteryzujących się różnym poziomem dokładności ale też różnym nakładem zasobów obliczeniowych. Zdecydowanie najszybsze są modele typu ray tracing [4], które modelują przebieg wiązki ultradźwiękowej za pomocą

pęku promieni wychodzących ze środka przetwornika odbijających i załamujących się na granicach materiałów, przez które przechodzi fala ultradźwiękowa. Modele takie dają pierwsze przybliżenie sposobu propagacji wiązki ultradźwiękowej w badanym obiekcie i są szczególnie efektywne w modelowaniu kolejnych odbić od płaskich lub zakrzywionych powierzchni badanego elementu [6]. Ich wadą jest natomiast brak uwzględnienia efektów dyfrakcyjnych w polu ultradźwiękowym wiązki przez co nie pozwalają one na dokładne obliczenia amplitudy pola ultradźwiękowego, szczególnie w polu bliskim głowicy.

Na drugim krańcu jeśli chodzi o dokładność obliczeń pola ultradźwiękowego znajdują się modele wykorzystujące metodę elementów skończonych MES [7]. Uwzględniają one pełne spektrum zjawisk zachodzących podczas propagacji fali ultradźwiękowej (dyfrakcja, odbicie i transformacje) jednak kosztem nieproporcjonalnie dużego nakładu zasobów obliczeniowych takich jak pamięć operacyjna komputera i czas obliczeń [3,7]. Wysokie koszty oraz długie czasy obliczeń nie znajdują uzasadnienia przy rutynowym modelowaniu badań ultradźwiękowych w zastosowaniach NDT.

W programie SymUT podobnie jak w oprogramowaniu CIVA [2] do obliczeń pola ultradźwiękowego głowic wykorzystano rozwiązanie pośrednie czyli model analityczno-numeryczny oparty na równaniu Rayleigha-Sommerfelda oraz metodzie pencil tracing [8,9]. Model ten pozwala na dokładne obliczanie pola ultradźwiękowego dla większości typów głowic stosowanych w badaniach nieniszczących, poprawnie uwzględniając zjawisko dyfrakcji oraz efekt załamania i odbicia wiązki na granicy materiałów. Z punktu widzenia zastosowań w NDT jedynym istotnym ograniczeniem metody pencil tracing jest konieczność aby granice między ośrodkami, przez które przechodzi modelowana wiązka ultradźwiękowe były płaskie lub nieznacznie zakrzywione (promień krzywizny znacznie większy od długości fali). W szczególności ograniczenie to może dotyczyć głowic o profilowanej przyłdze stosowanych do badań rur i prętów o małej średnicy.

Zastosowany model obliczeniowy jest w istocie matematyczną implementacją powszechnie znanej zasady Huygensa, która mówi, że pole ultradźwiękowe wytworzone przez przetwornik głowicy w pewnym punkcie badanego ośrodka jest sumą fal cząstkowych wychodzących z poszczególnych punktów drgającego przetwornika. Obliczenie amplitudy fali ultradźwiękowej w danym punkcie wiązki sprowadza się zatem do scałkowania amplitud wszystkich fal cząstkowych wychodzących z powierzchni przetwornika. Zadanie to jest stosunkowo proste w jednorodnym izotropowym ośrodku sprężystym bowiem wszystkie fale cząstkowe są falami kulistymi o równomiernej amplitudzie, zależnej jedynie od odległości między punktem nadania i odbioru fali cząstkowej. W przypadku konfiguracji stosowanych w badaniach nieniszczących, np. dla głowic kątowych, amplituda fali cząstkowej zależy nie tylko od odległości między punktami nadania i odbioru lecz także od zmiany kąta wiązki na granicy klin-głowica czy też współczynnika transmisji fali na tej granicy. Matematyczne

uwzględnienie tych efektów jest nieco skomplikowane, jednak możliwe do wykonania w sposób analityczny (metodą pencil tracing) dzięki czemu obliczenia pola ultradźwiękowego wiązki są możliwe do wykonania na standardowych komputerach klasy PC.

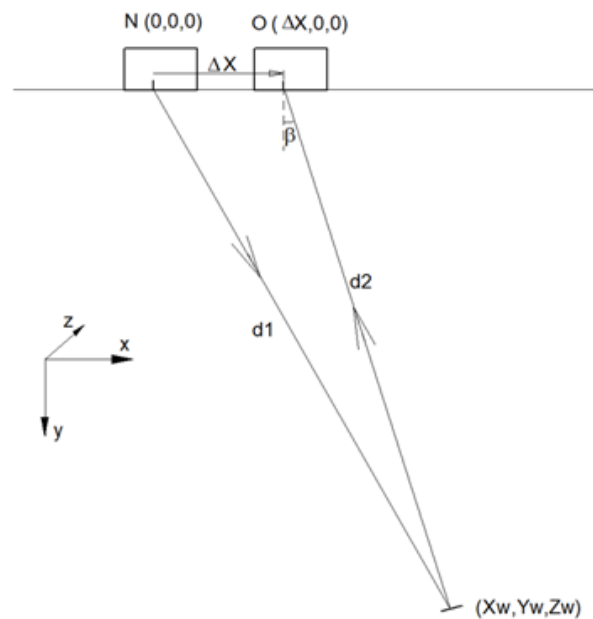
Należy jednak pamiętać, że obliczenie pola ultradźwiękowego na jednej, podstawowej częstotliwości głowicy jest niewystarczające w przypadku głowic o średniej lub dużej szerokości pasma przenoszenia (parametr BW głowicy powyżej c.a. 30%). W takim przypadku należy obliczyć zespolone (tj. uwzględniające amplitudę i fazę) wartości pola ultradźwiękowego dla szeregu częstotliwości zawartych w widmie impulsu a następnie dokonać odwrotnej transformaty Fouriera w celu obliczenia impulsu odpowiedzi w dziedzinie czasu. Dopiero maksymalna wartość amplitudy tego impulsu daje nam wartość amplitudy impulsu fali ultradźwiękowej rejestrowanego w danym punkcie wiązki ultradźwiękowej.

Obliczenie amplitudy pola ultradźwiękowego generowanego przez określoną głowicę w badanym materiale jest bardzo ważną informacją dla specjalisty planującego badanie ponieważ pozwala na sprawdzenie czy przewidywane wady materiałowe będą pokryte wiązką ultradźwiękową o dostatecznie dużej amplitudzie. Nadal jednak jest to informacja niewystarczająca do pełnej oceny skuteczności badania. Wiadomo bowiem, że amplituda ech ultradźwiękowych rejestrowanych podczas badania silnie zależy nie tylko od amplitudy padającej wiązki ultradźwiękowej, lecz także od orientacji defektów względem kierunku padającej na nie fali ultradźwiękowej. Drugą kluczową funkcjonalnością programu symulacyjnego musi być więc obliczanie amplitudy ech ultradźwiękowych odbitych od wad modelowych stanowiących wyidealizowane przybliżenia wad rzeczywistych. W programie SymUT zaimplementowano wady modelowe w postaci reflektorów kołowych oraz prostokątnych o dowolnym położeniu, rozmiarze i orientacji. Wady modelowe tego typu stanowią dobre przybliżenie dla wszelkich wad płaskich (pęknięć, rozwarstwień, przyklejeń) spotykanych w szynach a także w wielu innych elementach będących przedmiotem badań ultradźwiękowych.

Obliczenia amplitudy ech ultradźwiękowych od wad modelowych oparto na tzw. zasadzie wzajemności (reciprocity principle) [10], która w pewnym uproszczeniu sprowadza się do stwierdzenia, że rozkład pola czułości głowicy ultradźwiękowej (pracującej jako odbiornik) na punktowe źródła fal ultradźwiękowych jest taki sam jak rozkład pola ultradźwiękowego tej samej głowicy pracującej jako nadajnik. Przy obliczaniu amplitudy echa ultradźwiękowego rejestrowanego przez głowicę należy więc scałkować iloczyn jej pola nadawczego i odbiorczego po powierzchni wady uwzględniając dodatkowo współczynnik rozproszenia wynikający z kąta padania fali na całkowany element powierzchni wady. W modelu tym, dla obliczenia wspomnianego współczynnika rozpraszania, wykorzystuje się tzw. przybliżenie Kirchoffa [11], które zakłada, że powierzchnia wady powinna być płaska lub nieznacznie zakrzywiona a jej rozmiary znacznie większe niż długość

stosowanej fali ultradźwiękowej. Oba założenia są dobrze spełnione w przypadku zdecydowanej większości wad szyn kolejowych.

W modelu dynamicznym badania ultradźwiękowego zaimplementowanym w ostatniej wersji programu - SymUT RRD pole odbiorcze głowicy jest przesunięte względem jej pola nadawczego o wartość przesunięcia głowicy X , która wynika z szybkiego ruchu głowicy po powierzchni skanowania (Rys. 1). Wartość tego przesunięcia, obliczanego przez program automatycznie, jest zależna od prędkości i kierunku skanowania szyny oraz współrzędnych położenia wady w szynie (X_w, Y_w, Z_w).

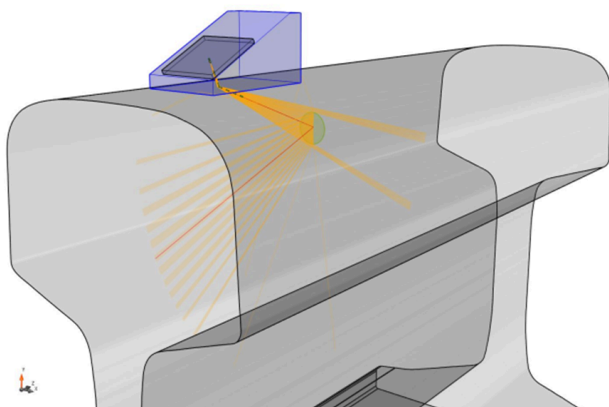


Rys. 1. Schemat badania ultradźwiękowego w modelu dynamicznym.

Fig. 1. Scheme of ultrasonic testing in a dynamic model.

W badaniach szyn, podobnie jak w wielu innych badaniach ultradźwiękowych, ważną informacją o wykrytej wadzie jest kształt obwiedni jej echa. Program SymUT RRD pozwala na symulację obwiedni echa wad modelowych zarówno w standardowym modelu quasi statycznym jak i w nowym modelu dynamicznym. W danym przypadku obwiednie echa wad obliczane są w funkcji przemieszczenia głowicy wzdłuż osi szyny X , czyli w taki sam sposób jak ma to miejsce w automatycznych badaniach szyn kolejowych. Przykładową konfigurację symulowanego badania szyny UIC 60 za pomocą głowicy kątowej 2T70 przedstawiono na Rys. 2.

W modelu quasi statycznym obwiednie ech obliczane są w postaci krzywych ciągłych co odzwierciedla fakt, że amplitudę echa można zarejestrować w każdym punkcie na drodze przesuwu głowicy. W modelu dynamicznym program, podobnie jak system badawczy, generuje obwiednie punktowe z krokiem odpowiadającym zastosowanej prędkości skanowania i częstotliwości powtarzania impulsów systemu ultradźwiękowego.



Rys. 2. Trójwymiarowy schemat symulowanego układu badawczego głowica-szyna wraz z położeniem defektu.

Fig. 2. Three-dimensional scheme of the simulated probe-rail test system including the position of the defect.

3. Przykłady symulacji pola ultradźwiękowego głowic

Jako pierwszy przykład wykorzystania programu symulacyjnego rozpatrzmy rozkład amplitudy pola ultradźwiękowego w polu bliskim standardowej głowicy ultradźwiękowej o symbolu 2L0-D25. Jest to typowa głowica normalna fal podłużnych o częstotliwości nominalnej 2 MHz i średnicy przetwornika 25 mm.

Rozpatrzmy w szczególności czy i kiedy fluktuacje amplitudy pola ultradźwiękowego w polu bliskim głowicy mogą powodować problemy z wykrywalnością mniejszych wad. Na Rys. 3 pokazano rozkłady amplitudy w polu bliskim tego typu głowicy w zależności od szerokości jej pasma przenoszenia przy 6 dB spadku (parametr BW wg PN-EN 12668-2). Poziomy amplitudy czułości ultradźwiękowej głowicy oznaczone są kolorami wg legendy zamieszczonej

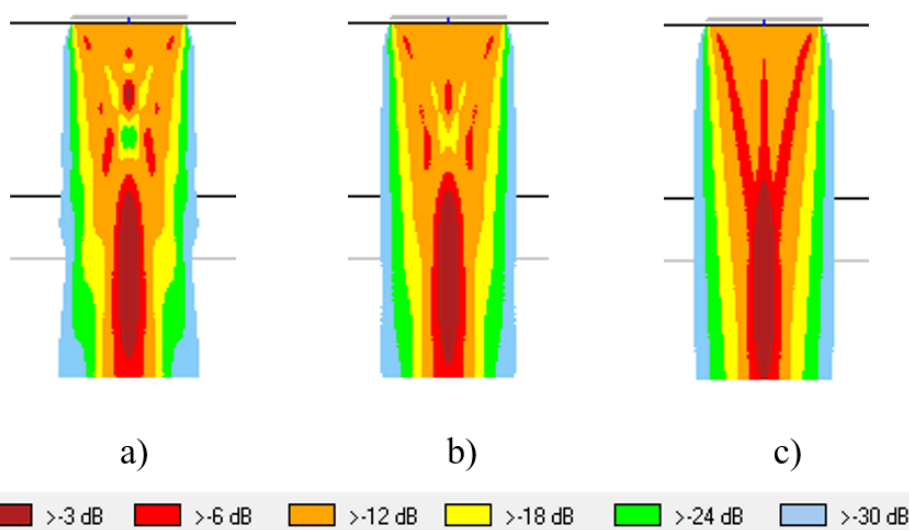
pod rysunkiem.

W przypadku wąskopasmowego wariantu głowicy 2L0-D25 (BW=20%) w polu bliskim obserwujemy kilka minimum i maksimum o różnicach amplitudy dochodzących do 24 dB. Najgłębsze minimum (kolor zielony) znajduje się na osi głowicy w połowie odległości do maksimum pola bliskiego. W praktyce oznacza to, że niewielka kilkumilimetrowa wada usytuowana w tym miejscu pola da echo ultradźwiękowe o ok. 24 dB mniejsze niż gdyby była usytuowana w maksimum pola bliskiego.

Dla typowej komercyjnej głowicy o średniej szerokości pasma przenoszenia (BW=40%) rozkład pola ultradźwiękowego jest bardziej jednorodny jednak nadal występuje wyraźne minimum (kolor żółty) w połowie długości pola bliskiego. Dopiero dla głowicy szerokopasmowej (BW = 80%) minimum to zanika i czułość głowicy w strefie pola bliskiego staje się bardziej równomierna. Nadal jednak występuje wyraźne maksimum na końcu pola bliskiego.

Ogólny wniosek jaki wynika z przeprowadzonych symulacji jest taki, że jeśli chcemy wykrywać i oceniać wady w polu bliskim głowicy ultradźwiękowej to należy używać głowicy szerokopasmowych (parametr BW > 80%). W innym przypadku należy liczyć się ze swego rodzaju "dziurą czułości" w samym środku pola bliskiego. Dodatkowo, niezależnie od szerokości pasma, należy liczyć się z faktem, że czułość głowicy będzie wykazywała wyraźne maksimum na końcu pola bliskiego, zaś w bliższych odległościach od głowicy będzie spadać o 6 do 12 dB względem tego maksimum.

Następny przykład zastosowania symulacji komputerowej będzie dotyczyć problemu stosowania głowic kątowych fal poprzecznych o nietypowych kątach załamania. Generalnie w badaniach nieniszczących stosuje się głowice kątowe o kątach załamania fali poprzecznej leżących w zakresie 45°-70°. Jednak w niektórych zastosowaniach korzystne może być wyjście poza ten standardowy zakres, np. z uwagi



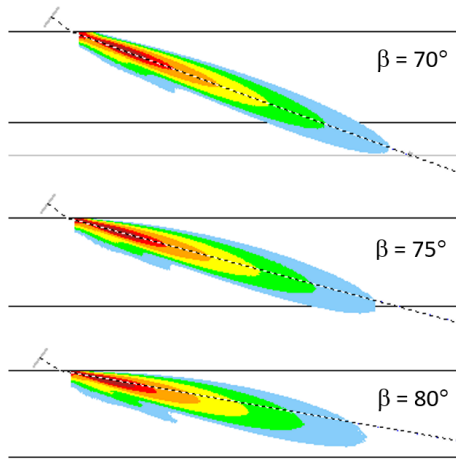
Rys. 3. Rozkład czułości ultradźwiękowej w polu bliskim głowicy 2L0-D25 w zależności od szerokości pasma przenoszenia głowicy a) BW=20%, b) BW=40%, c) BW=80%.

Fig. 3. Distribution of ultrasonic sensitivity in the near field of the 2L0-D25 probe head depending on its bandwidth a) BW=20%, b) BW=40% c) BW=80%.

na lepsze dostosowanie kąta wprowadzania fali do orientacji występujących wad.

Rozpatrzmy najpierw czy można zwiększyć kąt załamania głowicy do 75° czy nawet 80°. Rozpatrzmy w tym celu typową głowicę kątową o częstotliwości 4 MHz i rozmiarach przetwornika 10x10 mm z klinem załamującym wykonanym z PMMA. Obliczymy rozkłady pola ultradźwiękowego dla 3 wariantów takiej głowicy o kątach załamania odpowiednio: 70°, 75° i 80° (Rys. 4). Ponieważ wszystkie pokazane rozkłady pola ultradźwiękowego znormalizowane są do maksimum pola bliskiego aby porównać czułości różnych wariantów głowicy w Tab. 1 określono je w dB w odniesieniu do głowicy 4T70-A10x10 stanowiącej wariant bazowy. Przykładowo głowica 4T80-A10x10 ma w maksimum pola bliskiego czułość o 4,5 dB mniejszą niż głowica 4T70-A10x10.

Pierwszym wnioskiem jaki nasuwa się z analizy rozkładów pola ultradźwiękowego głowic z kątami załamania powyżej



Rys. 4. Rozkład czułości badania w polu ultradźwiękowym głowicy kątowej 4T-10x10 w zależności od nominalnego kąta załamania głowicy β .

Fig. 4. Test sensitivity distribution in the ultrasonic field of the 4T-10x10 angle beam probe in dependence on the nominal refraction angle β .

Tab. 1. Parametry pola ultradźwiękowego głowicy kątowej 4T-10x10 w zależności od nominalnego kąta załamania β .

Tab. 1. Parameters of the ultrasonic field of the 4T-10x10 angle beam probe in dependence on the nominal refraction angle β .

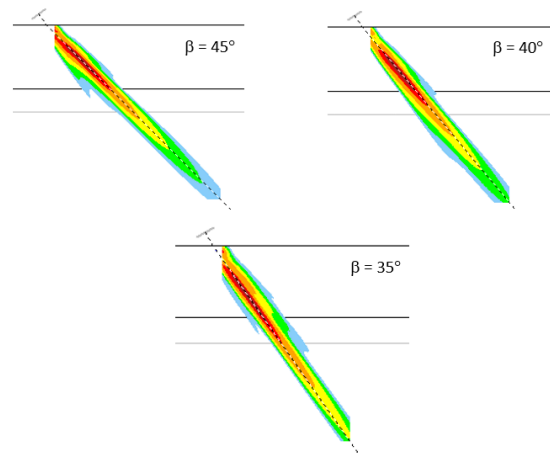
β_{nom}	β_{eff}	A_{max}
70°	69,6°	0,0 dB
75°	74,2°	-1,6 dB
80°	77,6°	-4,5 dB

70° (Rys. 4) jest narastająca różnica między nominalnymi i efektywnymi kątami załamania wiązki ultradźwiękowej. Dla głowicy o kącie nominalnym 75° rzeczywisty kąt załamania wynosi 74,2° natomiast dla głowicy o kącie nominalnym 80° zaledwie 77,6°. Wyraźnemu zwiększeniu ulega także rozbieżność wiązki ultradźwiękowej.

Generalnie, z punktu widzenia zastosowań w badaniach nieniszczących, są to efekty niekorzystne, jednak

w szczególnych przypadkach, np. gdy przewidujemy występowanie wad zorientowanych prostopadle do powierzchni badanego elementu, lepsze dostosowanie kąta padania do orientacji potencjalnych wad może przeważać nad efektem spadku czułości głowicy. Dotyczy to zwłaszcza głowic o kącie załamania 75°, dla których spadek czułości badania w stosunku do standardowych głowic T70 wynosi zaledwie 1,6 dB.

Rozpatrzmy teraz czym może skutkować zmniejszenie kąta załamania głowicy kątowej fal poprzecznych poniżej standardowej wartości 45°. Zauważmy, że z prawa Snelliusa wynika, że pierwszy kąt krytyczny dla granicy PMMA – stal odpowiada kątowi załamania fali poprzecznej w stali wynoszącemu ok. 33°. Oznacza to, że nie ma zasadniczych przeszkód aby konstruować głowice kątowe fal poprzecznych o kątach załamania mniejszych niż 45°. Zobaczmy zatem (Rys. 5.) jak wyglądają pola ultradźwiękowe głowic o kątach



Rys. 5. Rozkład czułości badania w polu ultradźwiękowym głowicy kątowej 4T-10x10 w zależności od nominalnego kąta załamania głowicy β .

Fig. 5. Test sensitivity distribution in the ultrasonic field of the 4T-10x10 angle beam probe in dependence on the nominal refraction angle β .

Tab. 2. Parametry pola ultradźwiękowego głowicy kątowej 4T-10x10 w zależności od nominalnego kąta załamania β .

Tab. 2. Parameters of the ultrasonic field of the 4T-10x10 angle beam probe in dependence on the nominal refraction angle β .

β_{nom}	β_{eff}	A_{max}
70°	44,6°	0,0 dB
75°	39,8°	-0,5 dB
80°	35,8°	-7,1 dB

nominalnych 35° i 40° w porównaniu do pola standardowej głowicy T45 przy założeniu, że wszystkie inne parametry głowic są jednakowe tj. : częstotliwość nominalna $f=4$ MHz, pasmo przenoszenia $BW=40\%$, wymiary przetwornika 10x10 mm.

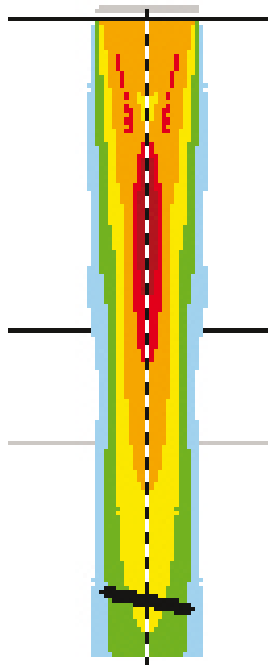
Porównując pola ultradźwiękowe głowic o kątach załamania 40° i 45° możemy stwierdzić, że jedyną istotną różnicą jest tutaj zmiana kąta załamania wiązki zgodna

z założonymi wartościami nominalnymi. Czułość głowicy T40 w maksimum pola bliskiego jest tylko o 0,5 dB mniejsza niż analogiczna czułość dla głowicy T45. Oznacza to, że głowice kątowe o kącie załamania 40° można bez problemu stosować w badaniach nieniszczących o ile tylko jest to korzystne z punktu widzenia geometrii badania.

Nieco inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku głowicy o kącie załamania 35° . Pole ultradźwiękowe tej głowicy jest wysoce niesymetryczne względem osi wiązki. Amplituda czułości głowicy jest wyraźnie obniżona po stronie mniejszych kątów załamania bliskich kąta krytycznego. Czułość głowicy T35 w maksimum pola bliskiego jest aż o 7,1 dB niższa od analogicznej czułości dla głowicy T45. Należy więc unikać stosowania głowic T35 w praktyce badań nieniszczących o ile tylko nie istnieje wyjątkowo silne uzasadnienie dla ich stosowania w określonych przypadkach.

4. Przykłady obliczeń obwiedni echa ultradźwiękowych

Poniżej pokazano przykład wykorzystania programu symulacyjnego do analizy zależności amplitudy echa niewielkiej wady płaskiej od kąta padania fali ultradźwiękowej na powierzchnię tej wady. Symulację przeprowadzono dla typowej głowicy normalnej 4L0-D12 (częstotliwość nominalna $f = 4$ MHz, średnica przetwornika $D = 12$ mm), która wykrywa wadę modelową w kształcie koła o średnicy 10 mm. Na Rys. 6 pokazano rozkład pola ultradźwiękowego



Rys. 6. Rozkład czułości badania w polu ultradźwiękowym głowicy normalnej 4L0-D12.

Czarną linią oznaczono wadę modelową o średnicy 10 mm położoną ukośnie na osi głowicy na głębokości 70 mm.

Fig. 6. Distribution of test sensitivity in the ultrasonic field of a 4L0-D12 probe. The black line indicates a model defect with a diameter of 10 mm located diagonally on the probe axis at a depth of 70 mm.

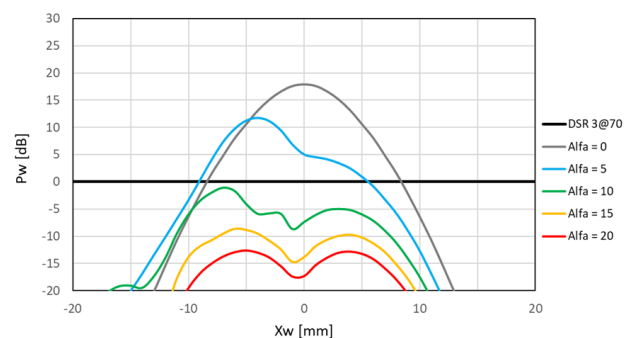
przedmiotowej głowicy wraz z przykładowym położeniem wady modelowej, w polu dalekim głowicy na głębokości 70 mm pod powierzchnią.

Wiadomo, że echo od tego typu wady płaskiej jest największe w przypadku gdy fala ultradźwiękowa pada na jej powierzchnię prostopadle, czyli pod kątem padania $= 0$. Jednak w praktycznych badaniach ultradźwiękowych taka idealna konfiguracja geometryczna zdarza się rzadko, rzeczywiste wady płaskie (pęknięcia, przyklejenia, rozwarstwienia) z reguły, są w mniejszym lub większym stopniu odchylone od prostopadłości względem osi padającej wiązki ultradźwiękowej.

Oznacza to, że przy planowaniu badania ultradźwiękowego bardzo ważna jest świadomość tego jak duży może być kąt padania fali na powierzchnię wady aby mogła ona zostać wykryta przy określonej czułości badania. Zamiast wykonywać, żmudne i czasochłonne testy na próbkach z wadami sztucznymi o odpowiednich rozmiarach i orientacjach problem ten można przeanalizować wykorzystując symulację komputerową obwiedni echa od odpowiedniej wady modelowej dla różnych położzeń i orientacji.

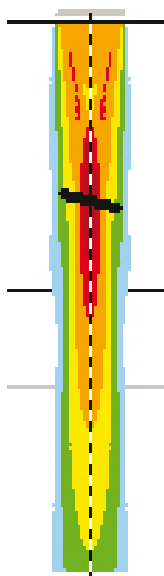
Na rys. 7 pokazano obwiednie echa wady kołowej o średnicy 10 mm położonej w polu dalekim głowicy (na głębokości 70 mm) wyliczone za pomocą programu SymUT. Czarna pozioma linia obrazuje poziom echa odniesienia od reflektora tarczowego DSR=3 mm położonego na głębokości 70 mm (DSR3@70).

Zgodnie z przewidywaniami obwiednia echa uzyskana dla wady zorientowanej pod kątem 0° jest najwyższa i osiąga swoje maksimum w położeniu $X_w=0$, w którym oś wiązki trafia dokładnie w środek wady. Już dla stosunkowo niewielkiego kąta odchylenia od prostopadłości ($=5^\circ$) amplituda obwiedni ulega istotnemu obniżeniu. Co ciekawe, maksimum obwiedni występuje tutaj nie w położeniu odpowiadającym środkowi wady lecz w położeniu $X_w=-4$ mm zbliżonym do położenia lewej krawędzi wady. Przy dalszym zwiększeniu kąta odchylenia wady od orientacji



Rys. 7. Obwiednie echa wady modelowej o średnicy 10 mm położonej na głębokości 70 mm w zależności od kąta odchylenia wady od prostopadłości względem osi wiązki.

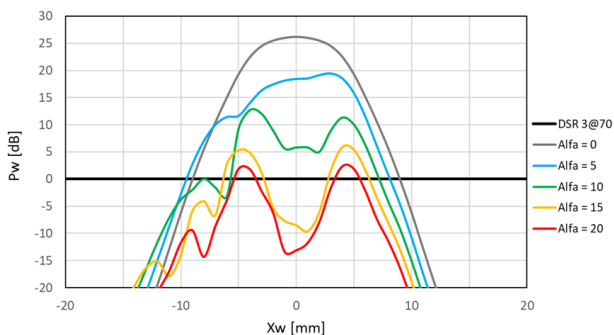
Fig. 7. Echo envelopes of a model defect with a diameter of 10 mm, located at a depth of 70 mm, depending on the angle of deviation of the defect from the perpendicular to the beam axis.



Rys. 8. Rozkład czułości badania w polu ultradźwiękowym głowicy normalnej 4L0-D12. Czarną linią oznaczono wadę modelową o średnicy 10 mm położoną na osi głowicy na głębokości 25 mm w maksimum pola bliskiego.

Fig. 8. Distribution of test sensitivity in the ultrasonic field of a 4L0-D12 probe. The black line indicates a model defect with a diameter of 10 mm located diagonally on the probe axis at a depth of 25 mm in the near field maximum.

optymalnej, odpowiednio do 10° , 15° i 20° , obserwujemy dalszy spadek amplitudy obwiedni, przy czym zaczynają ujawniać się dwa wyraźne maksima położone w punktach, w których oś wiązki znajduje się w pobliżu krawędzi wady. Oznacza to, że przy większych kątach odchylenia od prostopadłości, gdy powierzchnia wady odbija fale w kierunku odbiegającym od kierunku głowicy, zaczyna ujawniać się wpływ fal dyfrakcyjnych pochodzących od krawędzi wady.



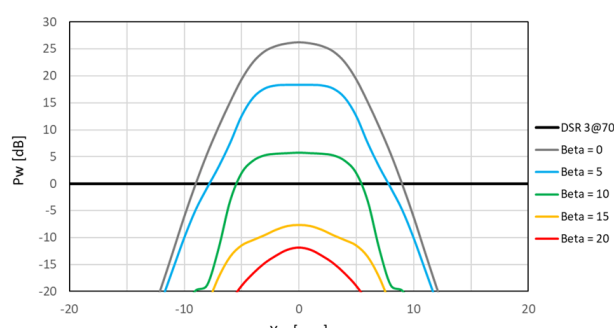
Rys. 9. Obwiednie echa wady modelowej o średnicy 10 mm położonej na głębokości 25 mm w zależności od kąta odchylenia wady od prostopadłości względem osi wiązki w płaszczyźnie skanowania.

Fig. 9. Envelopes of the echo of a model defect with a diameter of 10 mm located at a depth of 25 mm, depending on the angle of deviation of the defect in the scanning plane from the perpendicular to the beam axis.

Rozpatrzmy teraz przypadek, w którym wady modelowe znajdują się na głębokości 25 mm pod powierzchnią, tj. w odległości odpowiadającej maksimum pola bliskiego rozpatrywanej głowicy ultradźwiękowej (Rys. 8). W tym położeniu występuje efekt naturalnego ogniskowania pola ultradźwiękowego, dzięki czemu na symulowanych obwiedniach echa można lepiej zaobserwować wpływ krawędziowych fal dyfrakcyjnych na amplitudę rejestrowanych ech ultradźwiękowych.

Na Rys. 9 pokazano obwiednie echa wady modelowej w zależności od kąta odchylenia jej orientacji od prostopadłości względem osi wiązki w przypadku gdy odchylenie to występuje w płaszczyźnie skanowania (jak na Rys. 7). Ponieważ wada może być odchylna od prostopadłości do osi wiązki w dowolnej innej płaszczyźnie, na Rys. 10 pokazano obwiednie tej samej wady w przypadku gdy jest odchylana w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny skanowania.

Ze względu na mniejszą odległość wady od głowicy wszystkie obwiednie echa wad modelowych uległy podwyższeniu. Najciekawsze jest jednak to, że charakter obwiedni uzyskiwanych dla wad odchylonych od prostopadłości w płaszczyźnie skanowania i w płaszczyźnie prostopadłej jest całkowicie odmienny. Maksyma obwiedni dla wad odchylonych w płaszczyźnie skanowania (Rys. 9) są ostre, wysokie i skoncentrowane w punktach, w których oś wiązki trafia w krawędzie wady. Oznacza to, że głowica rejestruje wyraźne echa pochodzące od krawędziowych fal dyfrakcyjnych. Efektu tego nie obserwujemy w przypadku gdy wady odchylane są w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny skanowania (Rys. 10). W tym przypadku nie obserwujemy ech od fal krawędziowych pomimo tego, że oś wiązki przechodzi przez krawędzie wady modelowej. Jest to efekt bardzo niekorzystny dla czułości badania ultradźwiękowego ponieważ amplituda ech od wad odchylonych od prostopadłości o 10° spada wskutek tego o 7 dB, zaś odchylonych o 15° aż o 14 dB.



Rys. 10. Obwiednie echa wady modelowej o średnicy 10 mm położonej na głębokości 25 mm w zależności od kąta odchylenia wady - Beta od prostopadłości względem osi wiązki w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny skanowania.

Fig. 10. Envelopes of the echo of a model defect with a diameter of 10 mm located at a depth of 25 mm, depending on the angle of deviation of the defect in the plane perpendicular to the scanning plane from the perpendicular to the beam axis.

Wyjaśnienie stwierdzonej różnicy w występowaniu dyfrakcyjnych ech krawędziowych jest następujące. W przypadku wad kołowych odchylanych od prostopadłości w płaszczyźnie skanowania wiązka skanująca trafia w krawędzie wady pod kątem prostym. Dzięki temu fale cząstkowe wychodzące z „oświetlanych” fragmentów krawędzi wady interferują w jednakowej fazie dając wysokie echo. Inaczej jest w przypadku wad kołowych odchylanych od prostopadłości w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny skanowania. W tym przypadku oś wiązki trafia w krawędzie wady pod kątem równym kątowi odchylenia całej wady. Wskutek tego interferencja fal cząstkowych wychodzących z „oświetlanych” fragmentów krawędzi wady powoduje ich wzajemne wygaszanie dając w efekcie małe echo ultradźwiękowe.

Powyższa analiza modelowa wskazuje na istotne znaczenie fal rozproszonych na krawędziach nieciągłości w sytuacji gdy główna część energii fali padającej zostaje odbita (zgodnie z geometrycznym prawem odbicia) w kierunku odbiegającym od kierunku głowicy ultradźwiękowej. Oznacza to, że fale dyfrakcyjne rozproszone na krawędziach nieciągłości mają istotne znaczenie nie tylko w badaniach TOFD lecz także w klasycznych badaniach ultradźwiękowych prowadzonych metodą echa. W przypadkach gdy wiązka ultradźwiękowa trafia w ukośnie zorientowaną wadę dyfrakcyjne fale krawędziowe mogą podwyższyć amplitudę echa od takiej wady nawet o kilkanaście dB pod warunkiem, że oś wiązki trafia w krawędzie takiej wady pod kątem prostym. W niektórych przypadkach fale rozproszone na krawędziach mogą być wykorzystane do oceny głębokości pęknięć. Jednak w tym celu należy zapewnić aby naturalne ognisko głowicy (maksimum pola bliskiego) znajdowało się w obszarze występowania potencjalnych wad.

Ogólny wniosek z opisanych powyżej symulacji jest taki, że chcąc zmniejszyć negatywny wpływ niekorzystnej, przypadkowej orientacji wad na czułość badania ultradźwiękowego należy dążyć do tego aby maksimum pola bliskiego znajdowało się możliwie blisko przewidywanego obszaru występowania wad oraz stosować różne kierunki skanowania tak aby uzyskać zwiększyć szansę uzyskania optymalnego kąta padania zarówno na powierzchnie jak i na krawędzie wad.

5. Podsumowanie

W przedstawionej pracy opisano proste, przykładowe zastosowania oprogramowania symulującego badania ultradźwiękowe pokazujące jednak, że symulacje takie mogą prowadzić do konkretnych wniosków istotnych przy planowaniu rzeczywistych badań ultradźwiękowych. W praktyce badań nieniszczących typowy sposób wykorzystania tego rodzaju oprogramowania do optymalizacji procedur badawczych może przebiegać następująco.

W pierwszym etapie należy przeanalizować przedmiot badania pod kątem charakteru, umiejscowienia oraz orientacji potencjalnych wad. Następnie należy zdefiniować wady modelowe, które w możliwie najpełniejszy sposób odzwierciedlają istotne cechy wad rzeczywistych. Jest to bardzo ważny aspekt modelowania badań, w którym

doświadczenie i wiedza specjalisty badań ultradźwiękowych odgrywa kluczową rolę. Szczególnie ważna jest znajomość charakteru i położenia występujących w danym obiekcie wad oraz uchwycenie ich kluczowych cech możliwych do zaimplementowania w wadach modelowych. Wady modelowe z konieczności muszą być bardzo uproszczone (koła, prostokąty) jednak ich prawidłowe zdefiniowanie co do położenia, wielkości i orientacji może być na tyle reprezentatywne dla wad rzeczywistych, że wnioski z symulacji będą mieć znaczenie praktyczne.

W drugim etapie modelowania procesu badania należy dobrać głowice ultradźwiękowe w taki sposób aby z dostępnych obszarów skanowania uzyskać odpowiednie pokrycie wiązką ultradźwiękową wszystkich obszarów występowania wad. Obliczając rozkłady pól ultradźwiękowych dla wstępnie dobranych głowic można sprawdzić czy ich wiązki ultradźwiękowe pokrywają te obszary z odpowiednim poziomem czułości (np. przy spadku czułości badania nie większym niż -12 lub -18 dB względem maksimum pola bliskiego). Jeśli tak nie jest należy odpowiednio zmodyfikować parametry głowic (wielkość przetwornika, częstotliwość, kąt załamania) aż do uzyskania zadowalających rezultatów.

W trzecim etapie analizy modelowej należy obliczyć obwiednie ech od reprezentatywnych wad modelowych uzyskiwane za pomocą zoptymalizowanych głowic ultradźwiękowych. Na tym etapie może okazać się, że amplituda ech ultradźwiękowych uzyskiwanych od niektórych wad jest mała pomimo pokrycia obszaru wady wiązką ultradźwiękową o dużej amplitudzie. Efekt ten wynika najczęściej z niekorzystnej orientacji wady względem kierunku propagacji wiązki padającej. Aby poprawić warunki badania na tym etapie należy zmodyfikować kąty wprowadzania fal ultradźwiękowych odpowiednich głowic tak aby lepiej dopasować je do orientacji potencjalnych wad. Często okazuje się, że już niewielka zmiana kąta głowicy o 5 czy 10 powoduje zasadniczą poprawę amplitudy echa wad.

Opisany powyżej proces optymalizacji procedury badawczej drogą modelowania komputerowego może dać istotne korzyści przy planowaniu badań ultradźwiękowych, szczególnie w przypadku nowych lub nietypowych obiektów badań. Należy jednak podkreślić, że modelowanie i symulacja badań ultradźwiękowych za pomocą programów komputerowych nie zastąpi (przynajmniej na obecnym etapie) specjalistów badań ultradźwiękowych. Wynika to z faktu, że stosowane modele obejmują (i to w sposób uproszczony) jedynie niektóre aspekty badania ultradźwiękowego takie jak propagację wiązki ultradźwiękowej w wyidealizowanym materiale czy też uzyskiwanie ech ultradźwiękowych od wyidealizowanych wad. Wiele innych aspektów badania ultradźwiękowego (wpływ stanu powierzchni badania, stabilność sprzężenia akustycznego, poziom szumów elektronicznych i strukturalnych, jakość głowic i systemów ultradźwiękowych i wiele innych) musi być uwzględniona w oparciu o wiedzę i praktyczne doświadczenie specjalistów badań ultradźwiękowych. Pomimo wspomnianych ograniczeń programy komputerowe do symulacji badań

ultradźwiękowych powinny stanowić jedno z podstawowych narzędzi pracy dla specjalistów i ekspertów badań ultradźwiękowych w obszarze NDT.

6. Literatura

- [1] <https://eclipsescientific.com/beamtool.html>
- [2] <https://www.extende.com/ultrasonic-testing-with-civa>
- [3] S. Mackiewicz, „Modelowanie propagacji fal ultradźwiękowych w badaniach nieniszczących”, Materiały XXV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 20-22 marca 2019.
- [4] T. Katz T., S. Mackiewicz S., Z. Ranachowski, Z.L. Kowalewski, Ł. Antolik, “Ultrasonic detection of transversal cracks in rail heads - theoretical approach”, Engineering Transactions, ISSN: 0867-888X, Vol.69, No.4, pp.437-456, 2021
- [5] S. Mackiewicz, Wykorzystanie modelowania propagacji fal ultradźwiękowych do optymalizacji układów głowic stosowanych w technice TOFD, Materiały XXVI Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 23-26 maja 2023, pp.89-106
- [6] J.A. Johnson, N.M. Carlson, and D.M. Tow, “Ray Trace Calculations of Ultrasonic Fields.”, Res Nondestr Eval (1991) 3:27-39.
- [7] K. Harumi and M.Uchida, “Computer Simulation of Ultrasonics and Its Applications.”, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 9, Nos. 2/3 1990.
- [8] N. Gengembre, “Pencil method for ultrasonic beam computation.”, WCU 2003, Paris Sept. 7-10, 2003.
- [9] N. Gengembre and A. Lhémy, “Pencil Method in Elastodynamics. Application to Ultrasonic Field Computation,” Ultrasonics, Vol. 38, No. 1-8, 2000, pp. 495-499.
- [10] Auld B.A., “General electromechanical reciprocity relations applied to the calculation of elastic waves scattering coefficients”, Wave Motion, 1(1): 3-10, 1979, doi: 10.1016/0165-2125(79)90020-9.
- [11] L.W. Schmerr, Jr, “Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation. A Modeling Approach”. Second Edition, Springer International Publishing, Switzerland 2016.