

BADANIA ULTRADŹWIĘKOWE W SPRZĘŻENIU POWIETRZNYM

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

1. WSTĘP

Sprężenie akustyczne jest jednym z najważniejszych, choć czasem niedocenianych aspektów badania ultradźwiękowego. Pod tym ogólnym pojęciem kryje się sposób w jaki doprowadzamy drgania ultradźwiękowe wytworzone przez przetwornik elektromechaniczny (zazwyczaj płytkę wykonaną z ceramiki piezoelektrycznej) do obiektu badania i z powrotem. W najbardziej typowych, ręcznych badaniach ultradźwiękowych stosujemy w tym celu warstwę oleju, smaru lub żelu, która przenosi drgania ultradźwiękowe pomiędzy czołem głowicy a powierzchnią badanego elementu. W badaniach zautomatyzowanych najczęściej stosujemy sprężenie zanurzeniowe lub sprężenie za pomocą strumienia wody (*water jet coupling*), w którym fala ultradźwiękowa przechodzi między przetwornikiem a badanym elementem przez warstwę wody. W obu przypadkach kluczowe znaczenie ma ciągłość ośrodka sprzęgającego, tj. wyeliminowanie jakiegokolwiek szczeliny powietrznej lub bąbelków powietrza na drodze fali ultradźwiękowej. Oznacza to jednak, że powierzchnia badanego elementu narażona jest na nieuchronny kontakt z wodą, olejem, smarem lub innym ośrodkiem sprzęgającym. W niektórych przypadkach, jak np. badania drewna, papieru, membran półprzepuszczalnych czy paliwa raketowego jest to oddziaływanie wysoce szkodliwe i niepożądane. W takich przypadkach standardowe badanie ultradźwiękowe przestaje być badaniem nieniszczącym i wymaga modyfikacji.

W celu ominięcia problemu szkodliwego oddziaływania ośrodka sprzęgającego na badany materiał można stosować szereg różnych rozwiązań [1], z których żadne nie jest idealne, natomiast każde posiada określone zalety i ograniczenia. Istotne jest aby rozumieć podstawowe aspekty poszczególnych technik i umiejętnie dobierać je do określonych zastosowań.

Najprostszym rozwiązaniem dla wyeliminowania ośrodka sprzęgającego jest zastosowanie tzw. suchego sprężenia kontaktowego, w którym fala ultradźwiękowa przechodzi z przetwornika do badanego materiału wskutek bezpośredniego kontaktu mechanicznego ich powierzchni. Rozwiązanie takie wymaga jednak dokładnego przygotowania (szlifowania, polerowania) powierzchni styku a także zastosowania pewnego docisku przetwornika do badanego elementu tak by zapewnić maksymalną powierzchnię kontaktu. Opisany sposób sprężenia akustycznego z powodzeniem wykorzystano np. do laboratoryjnych pomiarów prędkości fal w próbkach stopów lekkich w wysokich temperaturach [2]. Inną formą suchego sprężenia kontaktowego jest zastosowanie warstwy plastycznego materiału (gumy silikonowej, miękkiego metalu) pomiędzy czołem głowicy a badanym elementem w celu dokładnego wypełnienia nierówności pomiędzy stykającymi się powierzchniami. Sposób ten nie wymaga tak dokładnego przygotowania powierzchni jak

kontakt bezpośredni jednak wprowadza do układu badawczego dodatkową warstwę materiału o słabo kontrolowanej grubości. Może to powodować silne wahania amplitudy rejestrowanych impulsów, poszerzać strefę martwą, a także wpływać na wyniki pomiarów grubości lub czasu przejścia. Generalnie, stosowanie suchego sprzężenia kontaktowego ograniczone jest do pomiarów laboratoryjnych lub badań jednostkowych. Ze względu na konieczność dobrego kontaktu mechanicznego między głowicą a badanym elementem technika ta nie nadaje się do badań automatycznych wymagających szybkiego skanowania powierzchni.

Drugą ważną techniką umożliwiającą wprowadzanie fal ultradźwiękowych bez stosowania ośrodka sprzęgającego jest EMAT (*Electro-Magnetic Acoustic Transducers*). Działanie głowic EMAT polega na wytworzeniu w badanym materiale (za pomocą cewki, przez którą przepływa prąd zmienny) podpowierzchniowych prądów wirowych przy jednoczesnym namagnesowaniu go silnym stałym polem magnetycznym. Generowane w materiale prądy wirowe odchylane są w stałym polu magnetycznym siłą Lorenza i oddziałują mechanicznie (poprzez rozpraszanie elektronów na jonach sieci krystalicznej) na badany materiał. Wywołane w ten sposób siły trakcyjne prowadzą do generowania w materiale fali ultradźwiękowej. Zjawisko odwrotne, czyli ruch elektronów wskutek przemieszczeń materiału wywołanych propagacją fali ultradźwiękowej prowadzi do cyklicznych zmian pola magnetycznego rejestrowanych przez cewkę głowicy. Na tej zasadzie głowica EMAT może nie tylko wytwarzać ale również odbierać fale ultradźwiękowe.

Bezkontaktowa technika EMAT ma jednak szereg istotnych ograniczeń. Po pierwsze, nadaje się wyłącznie do badań materiałów przewodzących, wykazujących przy tym silne właściwości ferroelektryczne, czyli w praktyce głównie do badań elementów wykonanych stali. Nie można tą techniką badać wymienionych wcześniej materiałów „nie lubiących” kontaktu z ośrodkiem sprzęgającym takich jak papier, drewno czy paliwo raketowe. Po drugie, amplituda fali ultradźwiękowej wytwarzanej przez głowice EMAT jest, nawet w stali, o trzy rzędy wielkości mniejsza niż amplituda fal wytwarzanych za pomocą standardowych przetworników piezoelektrycznych [3]. Stwarza to określone problemy związane z niskim stosunkiem sygnału do szumu, długą strefą martwą oraz niemożnością wykrywania mniejszych defektów. W praktyce technika ta znalazła zastosowanie w bezkontaktowych pomiarach grubości blach stalowych a także w pomiarach naprężeń własnych we wieńcach monoblokowych kół kolejowych metodą dwójłomności akustycznej [3].

Znacznie większy potencjał i spektrum zastosowań posiada kolejna z omawianych technik bezkontaktowych bazująca na wykorzystaniu laserów do generacji oraz detekcji fal ultradźwiękowych. Promień lasera może być wykorzystany do generacji impulsów ultradźwiękowych na dwa sposoby. Przy mniejszych energiach, krótkie impulsy promieniowania laserowego gwałtownie podgrzewają powierzchnię materiału powodując jego lokalne rozszerzanie się wskutek efektu termosprężystego. Gwałtowne rozszerzanie się i lokalny wzrost naprężeń materiału skutkuje wytworzeniem fal ultradźwiękowych propagujących się od miejsca oddziaływania promienia laserowego. Ze względu na charakterystykę efektu termosprężystego większość wytworzonej energii ultradźwiękowej propaguje się w postaci koncentrycznych fal powierzchniowych (lub fal Lamba w przypadku cienkich warstw), część w postaci fal poprzecznych a jedynie kilka procent w postaci fal podłużnych rozchodzących się prostopadle do powierzchni materiału. Taki sposób generacji fal ultradźwiękowych nie nadaje się do wielu zastosowań, np. do pomiarów grubości warstw czy wykrywania rozwarstwień. Na szczęście istnieje drugi, komplementarny sposób laserowej generacji fal ultradźwiękowych, który wytwarza głównie fale podłużne rozchodzące się w głąb materiału. Sposób ten polega na wykorzystaniu zjawiska ablacji, czyli gwałtownego odparowania powierzchniowej warstwy materiału wskutek oddziaływania silnego impulsu laserowego o gęstości mocy powyżej 10^7 W/cm². Pewną wadą mechanizmu ablacyjnego są nieuchronne mikro przypalenia powierzchni materiału w miejscach oddziaływania promienia laserowego. W niektórych przypadkach, np. przy badaniach paliwa raketowego, efekt ten może być wysoce destruktywny nie tylko dla badanego materiału ale i całego otoczenia.

Jeśli chodzi o laserową detekcję fal ultradźwiękowych to stosowane są w tym celu dobrze znane układy interferometryczne umożliwiające dynamiczne pomiary przemieszczeń powierzchni materiału z rozdzielczością powyżej 1 nm. Lasery stosowane do detekcji fal ultradźwiękowych są małej mocy i w żaden sposób nie uszkodzają powierzchni materiału.

Jak wspomniano laserowe techniki nadawania i odbioru fal ultradźwiękowych mogą mieć bardzo szerokie spectrum zastosowań, rozciągające się od badań złączy spawanych, poprzez pomiary grubości gorących elementów aż do badań papieru na liniach produkcyjnych. Jednym z najciekawszych wdrożeń tej techniki są opisane w pracy [4] zautomatyzowane pomiary grubości warstwy mokrego lakieru tuż po jego nałożeniu na karoserię samochodu. Takie natychmiastowe pomiary dają znacznie większe możliwości działań korygujących niż klasyczne pomiary grubości powłoki lakierniczej prowadzone po jej wyschnięciu.

Najważniejszym ograniczeniem techniki laserowej jest wysoki koszt aparatury, szczególnie impulsowego lasera dużej mocy, a także stacjonarny charakter stanowisk badawczych. Powoduje to, że wdrożenie tej techniki ma sens głównie w zautomatyzowanych liniach produkcyjnych, w sytuacji gdy wykorzystanie bardziej konwencjonalnych technik ultradźwiękowych jest z jakiegoś powodu niemożliwe lub wysoce utrudnione.

Biorąc pod uwagę opisane powyżej ograniczenia różnych technik badań ultradźwiękowych nie wymagających stosowania ośrodka sprzęgającego warto dokładniej przeanalizować, być może najprostszą i najtańszą z możliwych technik bezkontaktowych, czyli badania ultradźwiękowe w sprzężeniu powietrznym. W badaniach takich zakładamy, że rolę ośrodka sprzęgającego, przenoszącego fale ultradźwiękowe pomiędzy przetwornikiem a badanym obiektem, będzie pełnić otaczające nas powietrze. Zanim przejdziemy do krytycznej analizy takiego rozwiązania zauważmy najpierw korzyści jakie może dać badanie ultradźwiękowe w sprzężeniu powietrznym w porównaniu z klasycznym badaniem zanurzeniowym. Po pierwsze, unikamy budowy oraz integracji z systemem skanującym dodatkowego systemu hydraulicznego złożonego ze zbiornika, pompy wodnej, filtrów oraz połączeń do instalacji wodociągowej i kanalizacyjnej. Niezależnie od początkowych kosztów budowy takiego systemu występują stałe problemy z utrzymaniem zbiornika w czystości czy też oczyszczaniem i kondycjonowaniem wody. Po drugie, eliminujemy negatywny wpływ wody na badany materiał. Po trzecie wreszcie unikamy destrukcyjnego wpływu wody na mechanizmy skanujące, okablowanie oraz głowice.

Niezależnie od wielu oczywistych korzyści takiego rozwiązania badania ultradźwiękowe w sprzężeniu powietrznym (w skrócie ACUS od *Air-Coupled UltraSonics*) nie są jednak powszechnie stosowane. Widać istnieją ku temu określone powody. W niniejszym artykule przedyskutujemy podstawowe problemy i ograniczenia związane z tą techniką badań wskazując jednocześnie na istotne udoskonalenia w konstrukcji specjalnych głowic ultradźwiękowych a także w sposobach implementacji tej techniki dokonane w ostatnich kilkunastu latach. Omówimy także przykłady badań, w których technika ta może być skutecznie i efektywnie wykorzystana.

2. ANALIZA PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI ACUS

Na elementarnych kursach badań ultradźwiękowych mówi się czasem, że stosowanie ośrodka sprzęgającego w postaci, oleju, smaru lub wody jest konieczne po to aby wypełnić szczelinę powietrzną pomiędzy czołem głowicy a badanym materiałem. Sugeruje to, że obecność warstwy powietrza na drodze fali ultradźwiękowej jest czynnikiem wysoce szkodliwym, uniemożliwiającym przejście fali z głowicy do badanego materiału. Pierwszym wyjaśnieniem jakie może nasunąć się w związku z tym stwierdzeniem jest myśl, że powietrze jest ośrodkiem niezwykle silnie tłumiącym fale ultradźwiękowe skoro nawet cienka szczelina powietrzna uniemożliwia im przejście. Z drugiej strony na tych samych kursach mówi się słuchaczom, że ultradźwięki wykorzystywane są przez nietoperze do bardzo skutecznej nawigacji w powietrzu. Oznacza to, że rejestrują one echa ultradźwiękowe przychodzące z

odległości, co najmniej, kilkunastu metrów. Wydaje się zatem, że powyższe dwie informacje są ze sobą sprzeczne - gdyby tłumienie ultradźwięków w powietrzu było tak bardzo silne to nietoperze nie mogłyby wykorzystywać ich do nawigacji.

Rozpatrzmy zatem nieco dokładniej problem tłumienia fal ultradźwiękowych w powietrzu. Z analizy dostępnej literatury [5,6] wynika, że problem ten jest stosunkowo złożony a sama wartość współczynnika tłumienia zależy od częstotliwości fali oraz szeregu parametrów samego powietrza (temperatura, ciśnienie, wilgotność). Dla zakresu częstotliwości wykorzystywanych w badaniach nieniszczących (0,5 do 20 MHz) współczynnik tłumienia fal ultradźwiękowych - α w powietrzu można, w dobrym przybliżeniu, wyrazić następującym wzorem [5]:

$$\alpha \left[\frac{dB}{cm} \right] = 1,589 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p}{p_0} \right) f^2 \quad (1)$$

gdzie: f – częstotliwość fali ultradźwiękowej w MHz,

T – temperatura powietrza w skali bezwzględnej,

T_0 – temperatura odniesienia w skali bezwzględnej, równa 293,15 K (20°C),

p – ciśnienie powietrza w at,

p_0 – ciśnienie odniesienia, równe 1 at.

Widać z niego, że współczynnik tłumienia rośnie proporcjonalnie do kwadratu częstotliwości fali a także proporcjonalnie do ciśnienia oraz pierwiastka kwadratowego z temperatury powietrza. W tabeli 1 wyliczono wartości współczynnika tłumienia powietrza dla kilku typowych częstotliwości fal ultradźwiękowych przy założeniu, że badanie odbywa się w temperaturze 20°C przy ciśnieniu 1 at.

Częstotliwość fali f [MHz]	Współczynnik tłumienia α [dB/cm]
0,5	0,4
1,0	1,6
2,0	6,4
3,0	14,3
5,0	39,7
10,0	158,9

Tab. 1. Wartości współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych w suchym powietrzu w temperaturze 20°C przy ciśnieniu atmosferycznym 1 at.

Obliczone wartości wskazują, że tłumienie fal ultradźwiękowych w powietrzu nie powinno stanowić istotnej przeszkody w prowadzeniu badań techniką ACUS dla częstotliwości fal poniżej 2 MHz. Dla 3 MHz współczynnik tłumienia jest już dość znaczący, jednak skracając drogę dobiegu fali do badanego elementu do kilku mm można utrzymać całkowite tłumienie wnoszone przez warstwę powietrza w rozsądnych granicach. Dopiero powyżej 5 MHz współczynnik tłumienia powietrza staje się na tyle duży, że trudno będzie w praktyce przeprowadzić badanie.

Z przedstawionej analizy wynika jednak, że tłumienie fal ultradźwiękowych w powietrzu nie powinno stanowić istotnej przeszkody przy prowadzeniu badań ultradźwiękowych w zakresie częstotliwości poniżej 2 MHz. Co zatem powoduje, że wprowadzanie fal ultradźwiękowych „przez powietrze” jest tak problematyczne?

W tym celu należy nieco dokładniej przeanalizować cały proces generacji i przejścia fali ultradźwiękowej z głowicy do badanego elementu i z powrotem. Dla lepszej ilustracji podstawowych problemów rozpatrzmy to na przykładzie badania prowadzonego techniką przepuszczania, w analogii do zwykłego badania zanurzeniowego.

Na rys 1 pokazano schemat konwencjonalnego badania zanurzeniowego elementu stalowego prowadzonego głowicami z przetwornikami piezoelektrycznymi wykonanymi z ceramiki PZT.



Rys. 1. Schemat badania zanurzeniowego metodą przepuszczania pokazujący straty amplitudy fali ultradźwiękowej przy przechodzeniu kolejnych granic ośrodków.

Rozważmy straty amplitudy fali ultradźwiękowej związane z odbiciami na granicach ośrodków, przez które przechodzi fala ultradźwiękowa. Dla obliczenia tych strat posłużymy się znanym wzorem na współczynnik transmisji ciśnienia fali ultradźwiękowej na granicy ośrodków:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

Gdzie: Z_1 – impedancja akustyczna ośrodka, z którego wychodzi fala ultradźwiękowa,
 Z_2 – impedancja akustyczna ośrodka, do którego wchodzi fala ultradźwiękowa

W przypadku rozpatrywanego schematu badania odbicia fali ultradźwiękowej zachodzą na czterech granicach ośrodków, odpowiednio: PZT-woda, woda-stal, stal-woda, woda-PZT. Aby obliczyć sumaryczny spadek amplitudy impulsu przechodzącego między przetwornikiem nadawczym a odbiorczym należy obliczyć współczynniki transmisji na kolejnych granicach i przemnożyć je przez siebie:

$$T_{tot} = T_{12}T_{23}T_{32}T_{21} \quad (3)$$

gdzie T_{ij} oznaczają współczynniki transmisji na granicach między poszczególnymi ośrodkami oznaczonymi następującymi indeksami: 1 – ceramika PZT, 2 – woda, 3 – stal.

Dla wykonania powyższych obliczeń konieczna jest znajomość impedancji akustycznych wszystkich ośrodków, przez które przechodzi fala ultradźwiękowa. Wartości te, obliczone jako iloczyn prędkości fali i gęstości masy danego ośrodka, zestawiono w tabeli 2. W obliczeniach wykorzystano praktyczną jednostkę impedancji akustycznej nazywaną *MRayl* (*MegaRayl*) równą:

$$1MRayl = 10^6 Rayl = 10^6 \frac{kg}{m^2s} \quad (4)$$

Ośrodek propagacji	Prędkość fali C_L [m/s]	Gęstość masy ρ [g/cm ³]	Impedancja Z [MRayl]
<i>Ceramika PZT</i>	3880	7,7	30,0
Stal	5920	7,8	46,2
Aluminium	6300	2,7	17,0
PMM	2670	1,2	3,2
Woda (20°C)	1473	1,0	1,48
Powietrze (20°C)	344	$1,29 \cdot 10^{-6}$	0,00044

Tab. 2. Parametry akustyczne ośrodków rozpatrywanych w analizie porównawczej badań ultradźwiękowych prowadzonych w sprzężeniu wodnym i powietrznym.

Dla badania zanurzeniowego pokazanego na rys. 1 całkowity współczynnik transmisji amplitudy ciśnienia impulsu ultradźwiękowego wskutek strat na odbicie wynosi:

$$T_{tot} = T_{12}T_{23}T_{32}T_{21} = 0,094 \cdot 1,94 \cdot 0,062 \cdot 1,91 = 0,0216 \quad (5)$$

W przeliczeniu na decybele daje to straty wynoszące 33,3 dB co jest wartością znaczną, jednak łatwą do pokonania, przez współczesne defektoskopy ultradźwiękowe dysponujące dynamiką rzędu 90 – 100 dB. W przypadku badań materiałów o mniejszej impedancji akustycznej, takich jak aluminium, tworzywa sztuczne czy kompozyty, straty na odbicie będą jeszcze mniejsze co oznacza, że w klasycznych badaniach zanurzeniowych generalnie nie stanowią one problemu.

Rozpatrzmy teraz problem strat na odbicie w przypadku badania prowadzonego w sprzężeniu powietrznym, tj. przy założeniu, że w konfiguracji badawczej przedstawionej rys. 1 zamiast wody zastosujemy powietrze (o temperaturze 20°C pod ciśnieniem 1 at.). Zwróćmy uwagę, że impedancja akustyczna powietrza (patrz tab. 2) jest o 4 rzędy wielkości mniejsza niż impedancja akustyczna wody. Z tego względu całkowity współczynnik transmisji impulsu przechodzącego obliczony według wzoru (5) przyjmie teraz bardzo małą wartość wynoszącą:

$$T_{tot} = 0,000029 \cdot 1,99998 \cdot 0,000019 \cdot 1,99997 = 2,2 \cdot 10^{-9} \quad (6)$$

W przeliczeniu na decybele daje to straty amplitudy impulsu wynoszące aż 173 dB. Jest to wartość zdecydowanie przewyższająca zakres dynamiki produkowanych obecnie aparatów ultradźwiękowych. Oznacza to, że w konfiguracji badania pokazanej na rys. 1 nie ma szans na przeprowadzenie badania ultradźwiękowego elementu stalowego w sprzężeniu powietrznym. Przyczyną tego są bardzo duże straty wynikające z prawie całkowitego odbicia fali ultradźwiękowej na granicach ośrodków.

Podstawowe pytanie brzmi zatem, czy i w jaki sposób można ograniczyć wielkość tego rodzaju strat. Pierwszym nasuwającym się rozwiązaniem jest zmniejszenie impedancji materiału badanego, czyli rozpatrzenie możliwości badań materiałów niskoimpedancyjnych takich jak tworzywa sztuczne, papier czy kompozyty na bazie żywic epoksydowych. Dobrym reprezentantem tego typu materiałów jest polimetakrylan metylu, w skrócie PMM, którego impedancja akustyczna wynosi 3,2 MRayla. Całkowity współczynnik transmisji impulsu przechodzącego przy badaniu płyty wykonanej z PMM w sprzężeniu powietrznym wyniesie:

$$T_{tot} = 0,000029 \cdot 1,99972 \cdot 0,00027 \cdot 1,99997 = 3,1 \cdot 10^{-8} \quad (7)$$

Nadal, daje to całkowite straty amplitudy impulsu przechodzącego sięgające 150 dB, czyli zbyt wysokie jak na możliwości współczesnej aparatury. Sprawdźmy jednak, jaka część tych strat wynika z odbić na granicach powietrze-PMM, abstrahując na chwilę, od strat związanych z niedopasowaniem głowic. Współczynnik transmisji fal przez płytę wykonaną z PMM można obliczyć ze wzoru:

$$T_{tot} = T_{23}T_{32} = 1,99972 \cdot 0,00027 = 0,00054 \quad (8)$$

Po przeliczeniu na decybele daje straty przejścia wynoszące 65 dB, które są już w zasięgu współczesnej aparatury ultradźwiękowej, oczywiście pod warunkiem radykalnego podwyższenia efektywności głowic.

Jak widać z przeprowadzonej analizy dla zrealizowania koncepcji badań w sprzężeniu powietrznym konieczna jest istotna modyfikacja głowic ultradźwiękowych tak aby zminimalizować straty przejścia związane z niedopasowaniem akustycznym między ich przetwornikami a powietrzem. Problem ten próbowano rozwiązywać na wiele sposobów, nie znajdując jednak, jak dotychczas, całkowicie satysfakcjonującego rozwiązania. Opracowane typy głowic dają jednak pewne możliwości zastosowań w badaniach materiałów niskoimpedancyjnych, szczególnie technikami, w których nie jest wymagany wysoki stosunek sygnału do szumu. W następnym rozdziale omówimy podstawowe typy głowic opracowane na potrzeby badań ultradźwiękowych w sprzężeniu powietrznym.

3. GŁOWICE ULTRADŹWIEKOWE DO BADAŃ ACUS

Podstawowym problemem jaki należy rozwiązać przy konstruowaniu głowic ultradźwiękowych do badań w sprzężeniu powietrznym jest efektywne wprowadzanie fali ultradźwiękowej do ośrodka o bardzo małej impedancji akustycznej. Impedancja akustyczna ośrodka, zwana też czasem jego opornością falową, jest miarą oporu jaki stawia ośrodek sile wymuszającej wywieranej np. przez aktywną powierzchnię przetwornika głowicy. Ośrodek o małej impedancji łatwo poddaje się sile wymuszającej, co oznacza, że aby wytworzyć w nim duże ciśnienie akustyczne aktywna powierzchnia przetwornika musi drgać (przemieszczać się) ze znaczną amplitudą. Efekt taki można zaobserwować w skali makro patrząc na membrany głośników niskotonowych kolumn Hi-Fi przy odpowiednio dużym wysterowaniu głośności. Niestety przetworniki piezoelektryczne stosowane w klasycznych głowicach ultradźwiękowych odkształcają się minimalnie, nawet pod wpływem impulsów nadajnika o napięciu rzędu kilkuset V. Tym samym, za pomocą standardowych głowic piezoelektrycznych nie można wytworzyć w powietrzu fal ultradźwiękowych o dostatecznie dużym ciśnieniu akustycznym. Trzeba je odpowiednio zmodyfikować lub zastosować całkowicie odmienny sposób generacji i detekcji fal ultradźwiękowych w powietrzu. Okazuje się, że oba wspomniane podejścia znalazły zastosowanie w badaniach ultradźwiękowych techniką ACUS.

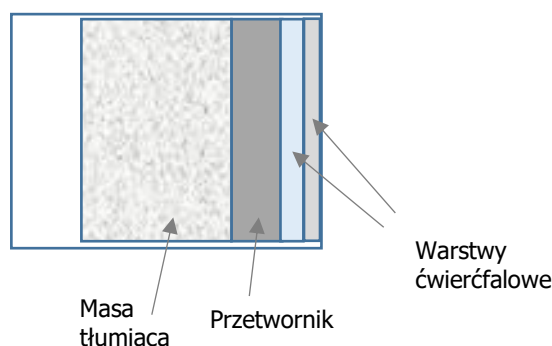
3.1. Głowice piezoelektryczne z warstwami dopasowującymi

Pierwszym rozwiązaniem przychodzącym na myśl specjalistom od badań ultradźwiękowych jest zastosowanie ćwierćfalowych warstw dopasowujących, podobnie jak się to robi w głowicach do badań zanurzeniowych. W przypadku głowic ACUS problem ten jest jednak znacznie trudniejszy ponieważ należy uzyskać dopasowanie ośrodków, których impedancje akustyczne różnią się o kilka rzędów wielkości (patrz tab. 2). Zgodnie z podstawową teorią warstw dopasowujących [7] w celu uzyskania optymalnego dopasowania dwóch ośrodków o impedancjach akustycznych odpowiednio: Z_1 i Z_2 należy zastosować warstwę ćwierćfalową (tj. warstwę o grubości $\frac{1}{4}$ długości fali w materiale warstwy) o impedancji akustycznej Z_w wyrażonej wzorem:

$$Z_w = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (9)$$

W przypadku konieczności dopasowania przetwornika piezoelektrycznego wykonanego z ceramiki PZT do powietrza impedancja akustyczna materiału optymalnej warstwy ćwierćfalowej powinna wynosić $Z_w = 0,115 \text{ MRayl}$. Okazuje się jednak, że nawet w przypadku znalezienia odpowiedniego materiału, dopasowanie za pomocą pojedynczej warstwy ćwierćfalowej nie byłoby wystarczające z uwagi na wysoce selektywny, wąskopasmowy charakter takiego dopasowania. Uzyskane wyniki badań [8] wskazują, że można w ten sposób zbudować głowice o stosunkowo wąskim paśmie częstotliwości, nie przekraczającym 10%. Głowice takie charakteryzują się długą strefą martwą oraz szerokim „dzwoniącym” impulsem, który nie zapewnia wystarczającej rozdzielczości przestrzennej w kierunku osiowym.

Chcąc uzyskać dopasowanie impedancyjne ceramiki PZT do powietrza w nieco szerszym zakresie częstotliwości należy użyć co najmniej dwóch lub nawet trzech warstw dopasowujących. Schemat głowicy piezoelektrycznej z układem 2 ćwierćfalowych warstw dopasowujących pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat głowicy z przetwornikiem piezoelektrycznym i dwiema warstwami ćwierćfalowymi.

Optymalne wartości impedancji akustycznych kolejnych warstw ćwierćfalowych w dopasowujących układach wielowarstwowych można obliczyć ze wzorów podanych w pracy [8]. Dla układu 2-warstwowego impedancje akustyczne kolejnych warstw (licząc od strony przetwornika) powinny wynosić:

$$Z_{w1} = \sqrt[3]{Z_1^2 Z_2} \quad \text{oraz} \quad Z_{w2} = \sqrt[3]{Z_1 Z_2^2} \quad (10)$$

Dla układu 3-warstwowego optymalne impedancje kolejnych warstw są następujące:

$$Z_{w1} = \sqrt[4]{Z_1^3 Z_2}, \quad Z_{w2} = \sqrt[4]{Z_1 Z_2^3} \quad \text{oraz} \quad Z_{w3} = \sqrt[4]{Z_1 Z_2^3} \quad (11)$$

gdzie Z_1 oraz Z_2 oznaczają impedancje akustyczne ośrodków dopasowywanych, czyli w naszym przypadku ceramiki PZT i powietrza.

W tabeli 3 zestawiono, wyliczone z powyższych wzorów, optymalne wartości impedancji akustycznych kolejnych warstw ćwierćfalowych dla przypadków 1, 2 i 3 warstwowego dopasowania ceramiki PZT do powietrza.

Układ dopasowania	Z_{w1} [MRayl]	Z_{w2} [MRayl]	Z_{w3} [MRayl]
1 warstwowy	0,115	-	-
2 warstwowy	0,73	0,018	-
3 warstwowy	1,86	0,115	0,007

Tab. 3. Zestawienie impedancji akustycznych warstw ćwierćfalowych dla idealnego dopasowania impedancyjnego ceramiki PZT do powietrza.

Jak widać z tab. 3 impedancje akustyczne wymagane dla ćwierćfalowych warstw dopasowujących są bardzo niskie, nawet w porównaniu do materiałów powszechnie uważanych za nisko impedancyjne. Przykłady takich materiałów to PMM ($Z=3,3$ MRayl), polistyren ($Z=2,3$ MRayl), żywica epoksydowa ($Z=2,8$ MRayl) czy miękka guma ($Z=1,4$ MRayl). W najlepszym przypadku mogą one stanowić materiał odpowiedni na pierwszą warstwę ćwierćfalową w układach 2 lub 3 warstwowych.

Okazuje się jednak, że we współczesnej technice istnieją komercyjnie produkowane materiały, które można z powodzeniem wykorzystać do wykonania niskoimpedancyjnych warstw ćwierćfalowych. Są to różnego rodzaju membrany filtracyjne wykonane na bazie cienkich folii polimerowych. Analizę tego typu materiałów pod kątem zastosowań w głowicach ultradźwiękowych na sprzężenie powietrzne przeprowadził Gomez [8,9]. Ponieważ są to materiały o bardzo wysokiej porowatości (c.a. 70%) oprócz pożądanej niskiej impedancji akustycznej charakteryzują się także (niepożądanym) wysokim tłumieniem fal ultradźwiękowych. Właściwy dobór membrany na warstwę ćwierćfalową musi zatem uwzględniać także wartość tłumienia fal ultradźwiękowych w jej materiale. Wynika to z faktu, że działanie dopasowujące warstwy ćwierćfalowej polega na konstruktywnej interferencji fal cząstkowych wielokrotnie odbitych wewnątrz warstwy. Jeśli wielokrotne odbicia zostaną szybko wygaszone ze względu na wysokie tłumienie materiału warstwy efekt dopasowania będzie słaby.

Z obliczeń przeprowadzonych przez Gomeza [8] wynika, że tłumienie w materiale warstwy ćwierćfalowej nie powinno przekraczać wartości 1,2 dB na jedną długość fali. Okazuje się, że wiele materiałów o dostatecznie niskiej impedancji akustycznej (np. papier, drewno balsa, porowaty PMM) nie spełnia tego dodatkowego warunku.

W tabeli 4 zestawiono parametry szeregu dostępnych komercyjnie membran filtracyjnych, które mogą być przydatne w konstrukcji głowic ACUS w zakresie częstotliwości 0,5 – 2 MHz. Membrany te spełniają zarówno warunek posiadania niskiej impedancji akustycznej jak też warunek odpowiednio niskiego współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych w rozpatrywanym zakresie częstotliwości. Dodatkowo, grubości membran są tak dobrane, aby ich rezonanse ćwierćfalowe pokrywały zakres częstotliwości od 0,5 do 2 MHz.

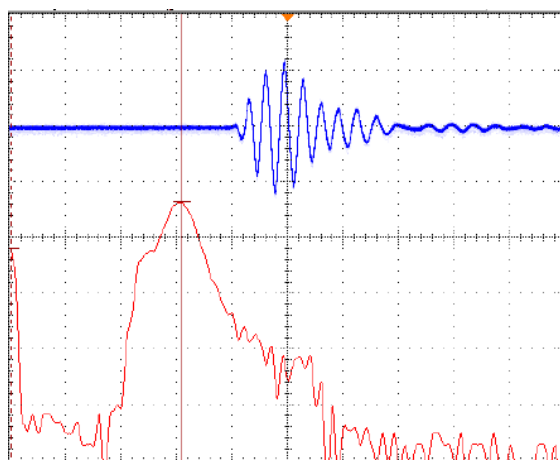
Należy zauważyć, że impedancje akustyczne dostępnych membran filtracyjnych są nadal wyższe niż idealne impedancje warstw ćwierćfalowych wyliczone w tabeli 3. Można jedynie dobrać materiały warstw tak aby zbliżyć się do wyliczonych wartości idealnych. Precyzyjne dobieranie impedancji akustycznej warstw ćwierćfalowych do wartości teoretycznych i tak nie prowadziłoby do uzyskania pełnego dopasowania impedancyjnego ośrodków z uwagi na znaczące tłumienie fal w materiale membran. W praktyce należy dobrać materiały warstw dopasowujących kierując się zarówno wyliczeniami teoretycznymi jak też dostępnością odpowiednich tworzyw oraz łatwością poddawania ich wymaganym operacjom technologicznym (np. zmiany grubości, klejenia).

Materiał membrany	Grubość membrany [μm]	Rozmiar porów [μm]	Prędkość fali [m/s]	Impedancja akustyczna [MRayl]	Częstotliwość rezonansu ćwierćfalowego [MHz]
<i>Poliaryloeterosulfon</i>	-	0,80	-	0,100	0,5
<i>Poliaryloeterosulfon</i>	145	0,45	374	0,131	0,65
<i>Poliaryloeterosulfon</i>	150	0,20	435	0,244	0,75
<i>Nylon</i>	-	0,45	-	0,162	1,0
<i>Poliaryloeterosulfon</i>	140	0,10	660	0,254	1,2
<i>Nylon</i>	123	0,20	850	0,313	1,6
<i>Ester celulozy</i>	92	0,025	910	0,557	2,0
<i>PVDF</i>	96	0,10	750	0,638	2,15

Tab. 4. Parametry membran filtracyjnych zalecanych do wykorzystania na warstwy ćwierćfalowe w konstrukcji głowic ACUS [8,12].

Niezależnie od trudności w znalezieniu odpowiednich materiałów na warstwy dopasowujące sam proces produkcji głowic na sprzężenie powietrzne jest bardzo wymagający. Np. łączenie membran filtracyjnych zwykłym klejem prowadzi do natychmiastowej infiltracji kleju w materiał membrany i degradacji jego właściwości akustycznych. Innym problemem jest ochrona zewnętrznej warstwy dopasowującej (wykonanej z delikatnej folii filtracyjnej) przez uszkodzeniem mechanicznym lub oddziaływaniem środowiska.

Komercyjna oferta głowic piezoelektrycznych ACUS jest stosunkowo ograniczona. Wynika to zarówno z opisanych trudności w projektowaniu i produkowaniu tego rodzaju głowic jak też z faktu, że badania ultradźwiękowe w sprzężeniu powietrznym są nadal dziedziną niszową i rynek zbytu na takie urządzenia jest ograniczony. Wiodącą pozycję na rynku głowic piezoelektrycznych do badań w sprzężeniu powietrznym zajmuje od lat amerykańska firma *The Ultrason Group* [10]. Firma oferuje głowice ACUS o częstotliwościach w zakresie od 50 kHz do 4 MHz o standardowej (30% – 50%) lub powiększonej (65% - 75%) szerokości pasma. Na rysunku 3 pokazano kształt oraz widmo impulsu przejścia dla jednej z oferowanych głowic o częstotliwości nominalnej 2 MHz.



Rys. 3. Kształt oraz widmo impulsu przejścia dla pary głowic NCT2-D13 firmy *The Ultrason Group* o częstotliwości nominalnej 2 MHz [10].

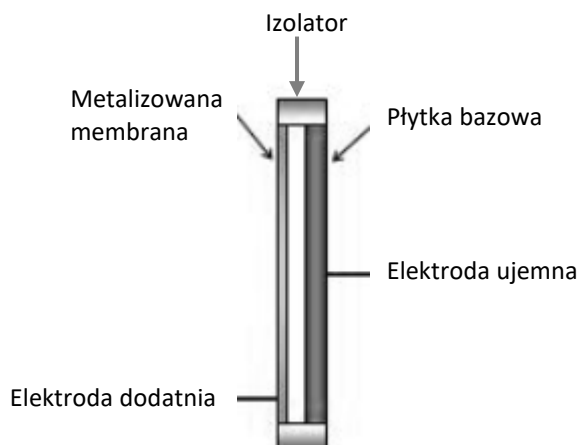
Całkowite straty przejścia przez 5 mm warstwę powietrza dla pary takich głowic wynosiły $S = -56$ dB. Dla porównania, całkowite straty przejścia dla pary standardowych głowic piezoelektrycznych, bez jakiegokolwiek dopasowania do powietrza, wynoszą $S = -85$ dB. Uzyskany wzrost efektywności nadawczo-odbiorczej głowic wynosi więc ok. 30 dB. Dla głowic ACUS o częstotliwościach nominalnych rzędu 0,5 MHz wzrost ten jest jeszcze większy i sięga 40 dB.

Poziom strat przejścia oferowany przez głowice ACUS z przetwornikami piezoelektrycznymi daje szansę na bezkontaktowe badania materiałów niskoimpedancyjnych metodą przepuszczania lub metodą *pitch-catch*. Warunkiem powodzenia jest zastosowanie odpowiednio silnych impulsów nadawczych dopasowanych do częstotliwości głowic. Nie wydaje się natomiast możliwe wykorzystanie ich do standardowych badań metodą echa. Stosunek sygnału do szumu SNR musiałby w tym przypadku wynosić grubo ponad 100 dB co przekracza możliwości współcześnie produkowanych defektoskopów ultradźwiękowych.

3.2. Głowice pojemnościowe

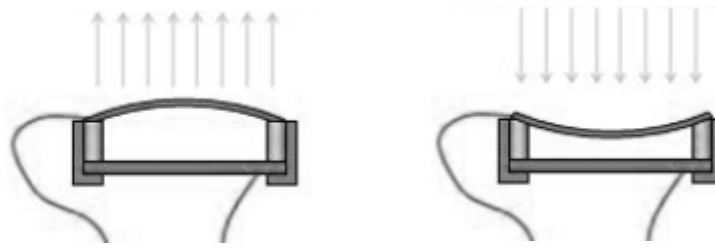
Drugim, całkowicie odmiennym, rodzajem głowic stosowanych w badaniach ultradźwiękowych w sprzężeniu powietrznym są tzw. głowice pojemnościowe (*capacitive ultrasonic transducers*), których zasadę działania zapożyczono z akustyki wzorując się na mikrofonach pojemnościowych. Omawianie tych głowic rozpoczniemy zatem od wyjaśnienia budowy oraz zasady działania najprostszego mikrofonu pojemnościowego.

Schemat budowy takiego mikrofonu pokazano na rys. 4. Składa się on z metalowej płytki bazowej oraz cienkiej, metalizowanej membrany umieszczonej równoległe do płytki bazowej w niewielkiej od niej odległości. Elementy te rozdzielone są za pomocą pierścienia dystansowego wykonanego z materiału izolacyjnego. W sumie, stanowią one prosty kondensator powietrzny, który można podłączyć do źródła napięcia stałego, nazywanego napięciem polaryzującym (*bias voltage*).



Rys. 4. Schemat budowy mikrofonu pojemnościowego.

Zobaczmy teraz co się stanie gdy na membranę takiego mikrofonu zacznie oddziaływać ciśnienie padającej fali akustycznej. Wynik takiego oddziaływania pokazano schematycznie na rys. 5. Membrana zacznie odkształcać się w takt zmian ciśnienia fali dźwiękowej, przybliżając się i oddalając od płytki bazowej.



Rys. 5. Zasada działania mikrofonu pojemnościowego.

Zmiany odległości między membraną i płytką bazową powodować będą zmiany pojemności kondensatora tworzego przez te elementy co w rezultacie spowoduje zmiany napięcia mierzonego między ich elektrodami. Wystarczy teraz podłączyć elektrody mikrofonu do odpowiedniego wzmacniacza napięcia zmiennego aby uzyskać sygnał elektryczny proporcjonalny do zmian ciśnienia akustycznego padającej na mikrofon fali dźwiękowej.

Należy teraz zauważyć, że pokazany mikrofon pojemnościowy może działać także w kierunku odwrotnym, czyli zamieniać sygnały napięciowe w drgania membrany wywołujące fale akustyczne. Jeśli do elektrod mikrofonu przyłożymy, oprócz stałego napięcia polaryzującego, dodatkowy silny impuls napięcia to na jego okładki (tj. płytkę bazową i membranę) dopłyną dodatkowe różnoimienne ładunki elektryczne, które spowodują zmianę siły elektrostatycznej działającej między płytką i membraną. W efekcie membrana zacznie drgać wytwarzając falę akustyczną.

Tak więc prosty układ elektromechaniczny pokazany na rys. 4 może stanowić dwustronny przetwornik elektroakustyczny działający podobnie jak klasyczna głowica ultradźwiękowa. Wielką zaletą takiego układu jest fakt, że impedancja akustyczna jego cienkiej, podatnej membrany może być o kilka rzędów wielkości niższa niż impedancja akustyczna przetwornika piezoelektrycznego. Tym samym, jest on znacznie lepiej dostosowany do wytwarzania i odbioru fal akustycznych w powietrzu niż klasyczna głowica ultradźwiękowa. W istocie rzeczy membrana przetwornika pojemnościowego naśladuje działanie strun głosowych ludzi i zwierząt, które również wytwarzają fale dźwiękowe na zasadzie drgań.

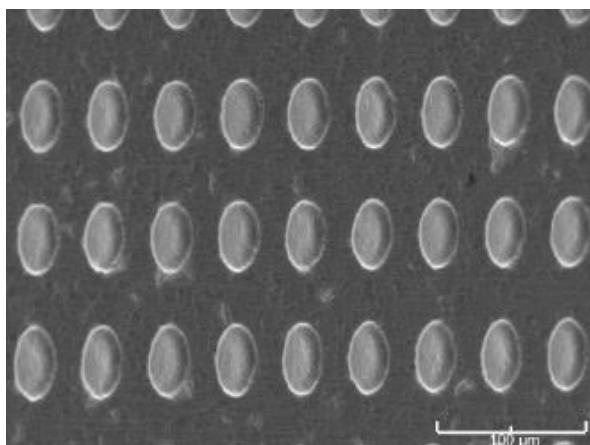
Rozparzmy teraz problemy jakie niesie ze sobą adaptacja takiego rozwiązania na potrzeby badań ultradźwiękowych, które wymagają wytwarzania i odbioru fal akustycznych o częstotliwościach rzędu kilku MHz, a nie jak w przypadku mikrofonów, maksymalnie do kilkudziesięciu kHz.

Istota problemu leży w częstotliwości rezonansowej membrany, która powinna być zbliżona do częstotliwości odbieranych lub wytwarzanych fal ultradźwiękowych. Częstotliwości rezonansowe membran głowic ultradźwiękowych muszą być do kilkuset razy wyższe niż częstotliwości rezonansowe membran mikrofonów pojemnościowych. Sposoby podwyższania częstotliwości rezonansowej przetworników pojemnościowych można antycypować analizując powszechnie znane reguły obowiązujące dla strunowych instrumentów muzycznych. Częstotliwość drgań rezonansowych struny jest tym wyższa im struna jest krótsza, cieńsza i silniej naprężona. Stosując podobne reguły dla podwyższenia częstotliwości rezonansowych membran przetworników pojemnościowych ich konstrukcję zmodyfikowano w ten sposób, że zamiast pojedynczej membrany pokazanej na rys. 4, zastosowano w niej setki mini membran rozmieszczonych na całej aktywnej powierzchni przetwornika. Typowy schemat takiego rozwiązania pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Schemat budowy pojemnościowej głowicy ultradźwiękowej.

Podobnie jak mikrofon, głowica pojemnościowa składa się z płytki bazowej wykonanej z przewodzącego materiału (miedzi, mosiądzu, krzemu), w której jednak, metodą mikroobróbki mechanicznej lub chemicznej, wykonuje się szereg mikro rowków lub mikro wgłębień. Dla głowic o częstotliwości podstawowej 1 MHz typowe średnice takich wgłębień wynoszą 40-50 μm przy 10 μm głębokości. Przykładowy obraz powierzchni płytki bazowej z wytworzonymi mikro wgłębieniami pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Powiększony obraz powierzchni płytki bazowej z wgłębieniami o średnicy 40 μm wykonanymi techniką wytrawiania [10].

Do powierzchni płytki bazowej przyklejona jest bardzo cienka (3 – 5 μm) folia polimerowa, metalizowana od strony zewnętrznej jeszcze cieńszą (100 – 200 nm) warstwą aluminium. W efekcie, swobodne powierzchnie folii ponad wgłębieniami tworzą setki mikro membran połączonych wspólnymi elektrodami. Kluczowe znaczenie ma dokładność wykonania obróbki mechanicznej płytki bazowej a także dokładność operacji klejenia membrany z płytką. W szczególności stosowany klej nie może w żadnym przypadku dostać się do objętości mikrozagłębień.

Dla odpowiedniego działania tak przygotowanego układu mikro membran konieczne jest jeszcze ich odpowiednio silne naprężenie. Osiąga się to poprzez przyłożenie do elektrod głowicy odpowiednio dużego napięcia polaryzacyjnego. W opisywanych rozwiązaniach aparaturowych [6,11] stosowano napięcia stałe w zakresie 100 – 300 V.

W przypadku wykorzystywania spolaryzowanej głowicy pojemnościowej jako generatora fal ultradźwiękowych do jej elektrod przykłada się dodatkowo krótki impuls napięcia, który jednocześnie pobudza do drgań wszystkie mikro membrany. Fale cząstkowe wychodzące od poszczególnych mikro membran są zgodne w fazie i interferując tworzą jeden wspólny front falowy wychodzący z aktywnej powierzchni głowicy.

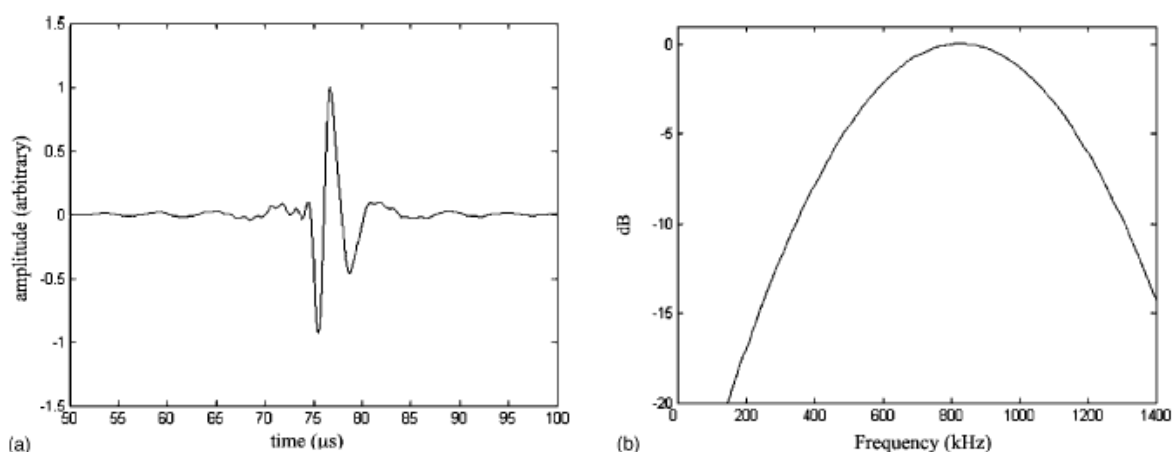
W przypadku wykorzystywania spolaryzowanej głowicy pojemnościowej jako odbiornika fal ultradźwiękowych jej elektrody podłącza się do szerokopasmowego wzmacniacza. Fluktuacje ciśnienia akustycznego padającej fali ultradźwiękowej wywołują drgania mikro membran, które powodują niewielkie zmiany pojemności elektrycznej głowicy. To z kolei przekłada się na zmiany napięcia elektrycznego na jej elektrodach, które po wzmacnieniu stanowią sygnał odbiorczy głowicy.

Głowice pojemnościowe często wykonuje się jako głowice skupiające fale ultradźwiękowe w powietrzu. Uzyskuje się to poprzez ukształtowanie powierzchni płytki bazowej w kształcie cylindra lub sfery. Budowę, procedurę wykonania oraz testy praktyczne tego rodzaju głowic opisano np. w pracy [11]. Fotografiją jednej z głowic wykonanych w ramach tej pracy pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Fotografija pojemnościowej głowicy skupiającej z powierzchnią aktywną ukształtowaną w postaci sfery.

Jak już wspomniano głowice pojemnościowe charakteryzują się znacznie lepszym dopasowaniem do impedancji akustycznej powietrza niż opisywane wcześniej głowice piezoelektryczne. Przekłada się to na lepszy stosunek sygnału do szumu oraz na szersze pasmo przenoszenia takich głowic. Na rys. 9 pokazano typowy kształt impulsu oraz pasmo przenoszenia typowej głowicy pojemnościowej o częstotliwości podstawowej 0,8 MHz. Charakterystyczny jest krótki czas trwania impulsu oraz szerokie pasmo częstotliwości obejmujące (przy 6-dB spadku) zakres od 0,4 do 1,2 MHz. Daje to procentową szerokość pasma $B = 100\%$ porównywalną do najlepszych głowic piezoelektrycznych stosowanych w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych.



Rys. 9. Kształt impulsu a) oraz pasmo częstotliwości b) typowej głowicy pojemnościowej o częstotliwości podstawowej $f = 0,8$ MHz.

Przy wszystkich zaletach głowic pojemnościowych ACUS mają one jednak jedną zasadniczą wadę z punktu widzenia zastosowań w typowych laboratoriach badań nieniszczących. Otóż, nie mogą one współpracować ze standardowymi defektoskopami

ultradźwiękowymi, które nie wytwarzają stałego napięcia polaryzacyjnego a jedynie krótkie impulsy pobudzające. Tym samym ich stosowanie wymaga dodatkowego zakupu specjalistycznej (i stosunkowo drogiej) aparatury ultradźwiękowej dostosowanej do współdziałania z głowicami pojemnościowymi. Nakłady związane z wdrożeniem badań w sprzężeniu powietrznym przy zastosowaniu głowic pojemnościowych mogą być zatem uzasadnione jedynie w przypadku realizacji stosunkowo dużych, dobrze finansowanych projektów.

W przypadku mniejszych lub bardziej okazjonalnych zastosowań badań ACUS bardziej uzasadnione będzie wykorzystanie głowic piezoelektrycznych z warstwami dopasowującymi, które bez problemu współpracują ze standardowymi defektoskopami ultradźwiękowymi.

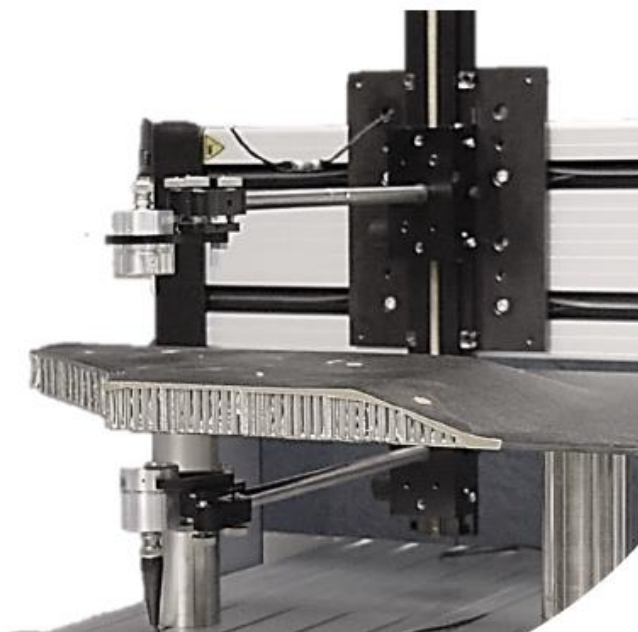
4. PRZYKŁADOWE ZASTOSOWANIA BADAŃ ACUS

Biorąc pod uwagę podstawowe ograniczenia fizyczne związane z wprowadzaniem fal ultradźwiękowych przez powietrze należy wyraźnie stwierdzić, że technika ACUS nie jest i nie będzie konkurencyjna w przypadkach, gdy w określonym badaniu można bez problemu zastosować konwencjonalne sprzężenie kontaktowe lub zanurzeniowe. Jej potencjał przejawia się w przypadkach, gdy zastosowanie standardowych ośrodków sprzęgających jest problematyczne, czy to z uwagi na właściwości badanego materiału czy też z uwagi na określone warunki wykonywania badań.

Przykładów takich wyzwań dla badań ultradźwiękowych jest we współczesnej technice coraz więcej. Wiele z produkowanych materiałów nie może być podczas badań zanieczyszczonych lub narażonych na kontakt z wodą. Dotyczy to np. papieru, paneli drewnianych, paliw raketowych, żywności, leków, membran filtracyjnych czy też innych materiałów porowatych. Szereg materiałów należy badać na wczesnych etapach procesu produkcyjnego gdy nie są jeszcze odporne na oddziaływanie wody lub innych cieczy. Dotyczy to np. badań wyprasek proszkowych przed procesem spiekania, żywic epoksydowych przed i w trakcie procesu polimeryzacji czy też powłok lakierniczych przed zaschnięciem. W innych przypadkach same warunki badań nie pozwalają lub znacznie utrudniają stosowanie klasycznych środków sprzęgających. Dotyczy to np. badań na zautomatyzowanych liniach produkcyjnych, badań nawierzchni drogowej lub szyn kolejowych z poruszających się pojazdów inspekcyjnych czy też badań elementów znajdujących się w wysokiej temperaturze. We wszystkich tego typu przypadkach można obecnie rozważyć zastosowanie badań ultradźwiękowych w sprzężeniu powietrznym.

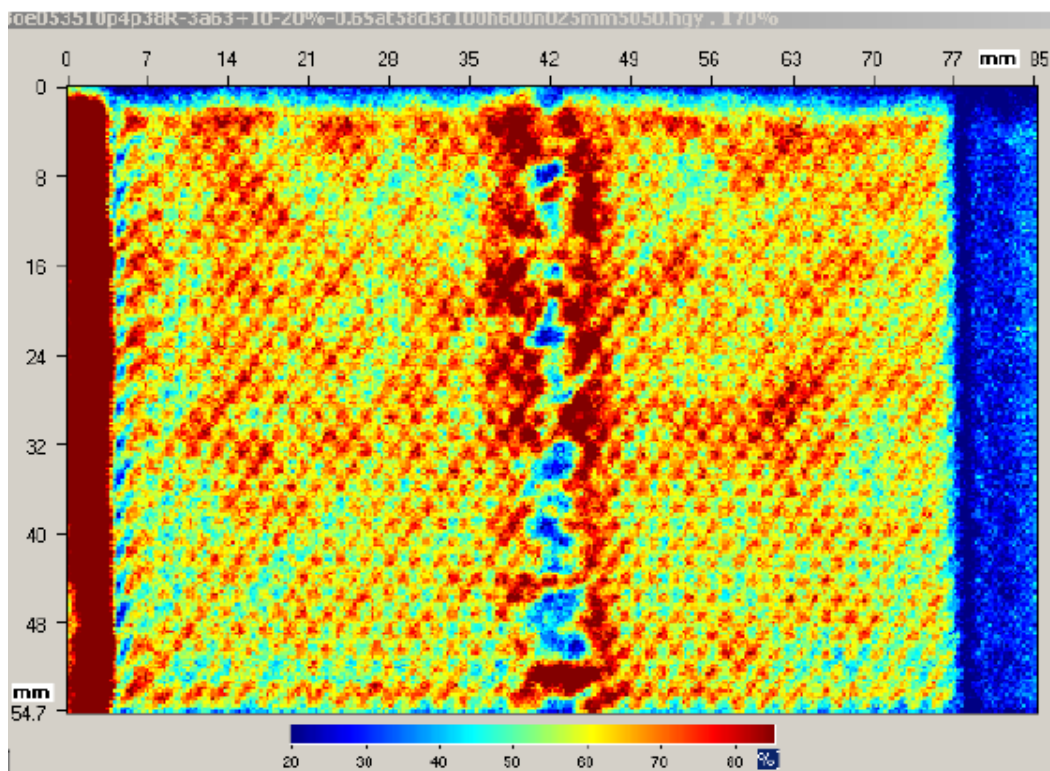
Biorąc pod uwagę relatywnie niski stosunek sygnału do szumu w badaniach ACUS podstawową konfiguracją badawczą, z zasady, powinna być metoda przepuszczania. Typowe stanowisko badawcze do badań paneli kompozytowych metodą przepuszczania pokazano na rys. 10. Składa się ono z dwóch głowic ACUS usytuowanych współosiowo po przeciwnych stronach badanego elementu. Głowice prowadzone są w pewnej odległości od powierzchni panelu, w sposób zautomatyzowany, rejestrując amplitudę fali ultradźwiękowej przechodzącej przez panel w powiązaniu ze współrzędnymi przestrzennymi X-Y głowic skanujących. Z zasady, w takich systemach stosowane są głowice skupiające o średnicy ogniska rzędu 1-2 mm. Dzięki temu system skanujący może zapewnić stosunkowo wysoką rozdzielczość obrazowania nawet dla głowic o częstotliwości podstawowej rzędu kilkuset kHz.

W oparciu o zarejestrowane dane ultradźwiękowe oprogramowanie sterujące systemu tworzy amplitudowy skan typu C będący mapą tłumienia fali ultradźwiękowej w panelu. Na tej podstawie operator znający budowę panelu jest w stanie ocenić prawidłowość jego wykonania, tj. wykryć obecność wad wypełniacza komórkowego, niedoklejeń wypełniacza do pokryć czy też rozwarstwień laminatu stanowiącego pokrycie.



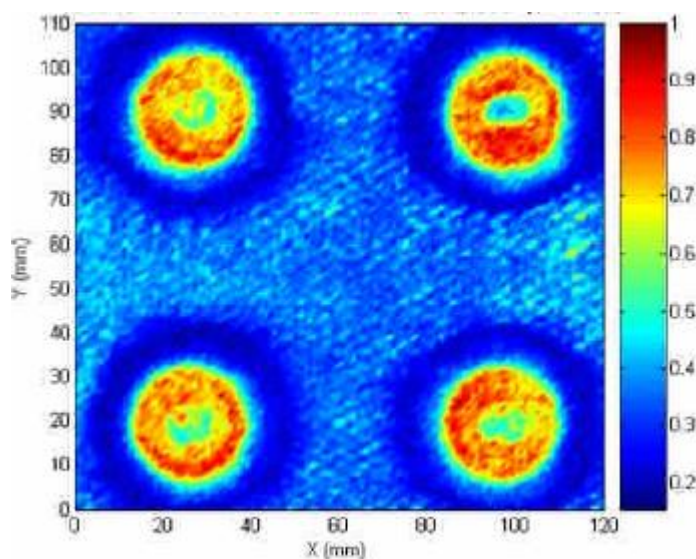
Rys. 10. Typowa konfiguracja stosowana do zautomatyzowanych badań ACUS paneli kompozytowych metodą przepuszczania.

Przykładowy skan panelu kompozytowego z wypełniaczem komórkowym wykonanym z Nomexu pokazano na rys. 11. Uwidoczniony został pas łączenia między blokami wypełniacza o zmniejszonym tłumieniu wskutek obecności kleju.



Rys. 11. Amplitudowy skan typu C panelu kompozytowego z wypełniaczem komórkowym wykonanym z Nomexu oraz pokryciami z laminatu węglowego.

Inny przykład badania ACUS panelu kompozytowego z wklejonymi wkładkami wzmacniającymi pokazano na rys. 12. Uzyskany obraz pozwala jednoznacznie określić położenia wkładek wewnątrz panelu jak również jakość ich połączenia z wypełniaczem komórkowym oraz pokryciami panelu.

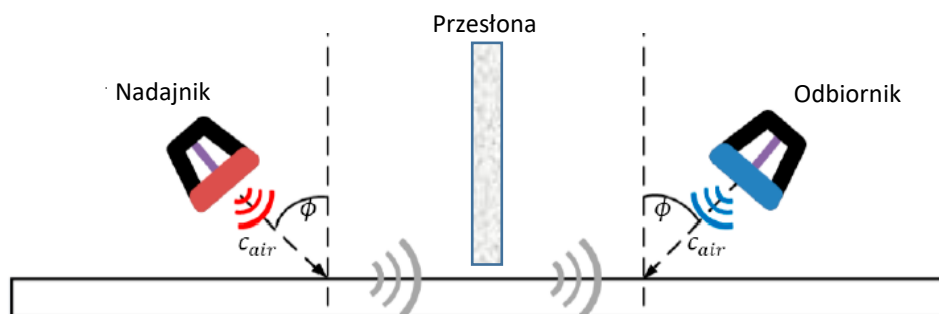


Rys. 12. Amplitudowy C-skan panelu kompozytowego z wypełniaczem komórkowym oraz wklejonymi wkładkami wzmacniającymi [11].

Analizując pokazane C-skany paneli kompozytowych można stwierdzić, że ich jakość nie odbiega znacząco od C-skanów uzyskiwanych konwencjonalnymi systemami ultradźwiękowymi ze strumieniowym sprzężeniem wodnym.

Systemy ACUS podobne do pokazanego na rys. 10 wykorzystywano także do badań paneli z wypełniaczem piankowym, paneli drewnianych a także kompozytów monolitycznych. Podobna konfiguracja badawcza może być z powodzeniem wykorzystana także do badań cienkich warstw materiałów takich jak papier, folie polimerowe czy membrany filtracyjne [6,12].

Jak wspomniano badania ultradźwiękowe w sprzężeniu powietrznym, o ile to możliwe, powinny być wykonywane metodą przepuszczania. Istnieją jednak sytuacje badawcze, w których trudno jest zastosować technikę transmisyjną. W takich sytuacjach można rozważyć zastosowanie techniki *pitch-catch*, w której obie głowice (tj. zarówno nadawcza jak i odbiorcza) umieszczone są po jednej stronie badanego elementu i pracują metodą przepuszczania. Podstawowy schemat badania ACUS przy zastosowaniu techniki *pitch-catch* pokazano na rys. 13.



Rys. 13. Schemat badania ACUS techniką *pitch-catch*.

Ponieważ fala ultradźwiękowa odbita bezpośrednio od powierzchni badanego materiału jest o kilka rzędów wielkości silniejsza od fali wchodzącej i wychodzącej z jego wnętrza konieczne jest dokładne odseparowanie głowicy nadawczej i odbiorczej, tak aby fale bezpośrednio odbite nie zagłuszały słabego impulsu wychodzącego z badanego elementu. W tym celu stosuje się specjalne przesłony akustyczne oddzielające głowicę nadawczą od odbiorczej. Konieczne jest też pewne odseparowanie przestrzenne obu głowic.

Techniką *pitch-catch* bada się płyty wykonane z materiałów kompozytowych, gumy lub tworzyw sztucznych [13,14]. Przedmiotem badań może być również ocena adhezji warstw wykonanych z tych materiałów do różnego typu podłoży. Podstawowa idea tego rodzaju badań polega na wytworzeniu w badanej płycie lub warstwie odpowiedniego modu fal Lamba (zazwyczaj A_0 lub S_0) i pomiarze jego prędkości lub/i tłumienia na drodze między głowicami. W ten sposób można wykryć zarówno wady samej płyty (rozwarstwienia, porowatości, pęknięcia) jak też ocenić stopień przylegania warstwy wierzchniej do podłoża.

Opisana technika badawcza wymaga pewnego przygotowania teoretycznego polegającego na obliczeniu krzywych dyspersji fal Lamba propagujących się w badanych płytach. Dopiero znając te zależności można prawidłowo dobrać częstotliwość głowic oraz kąt padania ich wiązki na powierzchnię płyty [14].

5. ZAKOŃCZENIE

Badania ultradźwiękowe w sprzężeniu powietrznym stają się coraz ważniejszą techniką badań ultradźwiękowych. Wiąże się to z coraz częstszą koniecznością badań materiałów lub wyrobów, które nie akceptują kontaktu z wodą lub innym ośrodkiem sprzęgającym. Drugim czynnikiem stymulującym rozwój technik ACUS są obniżone koszty budowy i obsługi zautomatyzowanych systemów skanujących, z których można wyeliminować system wodnego sprzężenia akustycznego.

Rozwój aparatury ultradźwiękowej do badań w sprzężeniu powietrznym umożliwia obecnie efektywne badania wielu materiałów niskoimpedancyjnych przy założeniu, że celem badań ma być pomiar grubości, właściwości akustycznych (prędkość, tłumienie) lub wykrywanie relatywnie dużych wad. Należy jednak wyraźnie powiedzieć, że badania ACUS nie mogą obecnie zastąpić badań kontaktowych lub zanurzeniowych w wielu głównych obszarach zastosowań badań ultradźwiękowych. Dotyczy to w szczególności badań złączy spawanych, odlewów, odkuwek czy też wszelkich innych elementów wykonanych ze stali lub materiałów o wysokiej impedancji akustycznej. Należy też pamiętać o innym ważnym ograniczeniu fizycznym związanym z szybkim wzrostem tłumienia fal ultradźwiękowych w powietrzu dla częstotliwości powyżej 2 MHz. Uniemożliwia to stosowanie techniki ACUS do badań wymagających wysokiej rozdzielczości przestrzennej lub wykrywania małych nieciągłości.

Podsumowując, należy stwierdzić, że badania ultradźwiękowe w sprzężeniu powietrznym stanowią obecnie dojrzałą i ugruntowaną technikę badawczą poszerzającą możliwości aplikacyjne metody ultradźwiękowej na określone materiały i wyroby, które z różnych względów nie mogą być badane technikami wykorzystującymi konwencjonalne sprzężenie akustyczne.

LITERATURA

- [1] J. Szelażek, Bezkontaktowe badania ultradźwiękowe., *Badania Nieniszczące*, Nr 21, 2003
- [2] J. Szelażek, S. Mackiewicz, P. Gutkiewicz, Ultrasonic measurement of the temperature dependence of elastic moduli in light alloys, *INSIGHT*, ISSN: [1354-2575](https://doi.org/10.1080/13542575.2010.500000), Vol.52, pp.380-385, **2010**
- [3] J. Szelażek, K. Mizerski, Elektromagnetyczno-akustyczna głowica do badania naprężeń własnych w elementach płasko-równoległych., *Badania Nieniszczące*, Nr 02-08-2005
- [4] J. Szelażek, Laserowe badania ultradźwiękowe., *Dozór Techniczny*, 6, 2006, s. 131-136
- [5] L.J. Bond, C.H. Chiang and C.M. Fortunko, Absorption of ultrasonic waves in air at high frequencies (10-20 MHz), *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 92, No. 4, October 1992.
- [6] D.E. Chimenti, Review of air-coupled ultrasonic materials characterization, *Ultrasonics* 54 (2014) pp. 1804-1816.
- [7] J. Obraz, *Ultradźwięki w technice pomiarowej.*, WNT, Warszawa 1983.
- [8] T.E. Gomez Alvares-Arenas, Acoustic Impedance Matching of Piezoelectric Transducers to the Air., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 51, No 5, May 2004.
- [9] T.E. Gomez Alvares-Arenas, Air-Coupled Piezoelectric Transducers with Active Polypropylene Foam Matching Layers, *Sensors*, 13, 2013.
- [10] <http://www.ultrangroup.com>
- [11] J. Song, D.E. Chimenti, Design, Fabrication and Characterization of a Spherically Focused Capacitive Air-Coupled Ultrasonic Transducer., *Int. J. Appl. Sci. Eng.*, 2006. 4,1.
- [12] T.E. Gomez Alvares-Arenas, Air-coupled ultrasonic spectroscopy for the study of membrane filters., *Journal of Membrane Science* 213 (2003) 195-207.
- [13] T.Y. Sunarsa, P.Aryan, I. Jeon, B. Park, P. Liu, H. Sohn, A Reference-Free and Non-Contact Method for Detecting and Imaging Damage in Adhesive-Bonded Structures Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers., *Materials* 2017, 10, 1402.
- [14] M. Castaings, B. Hosten, Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates., *NDT&E International* 34 (2001) 249-258

