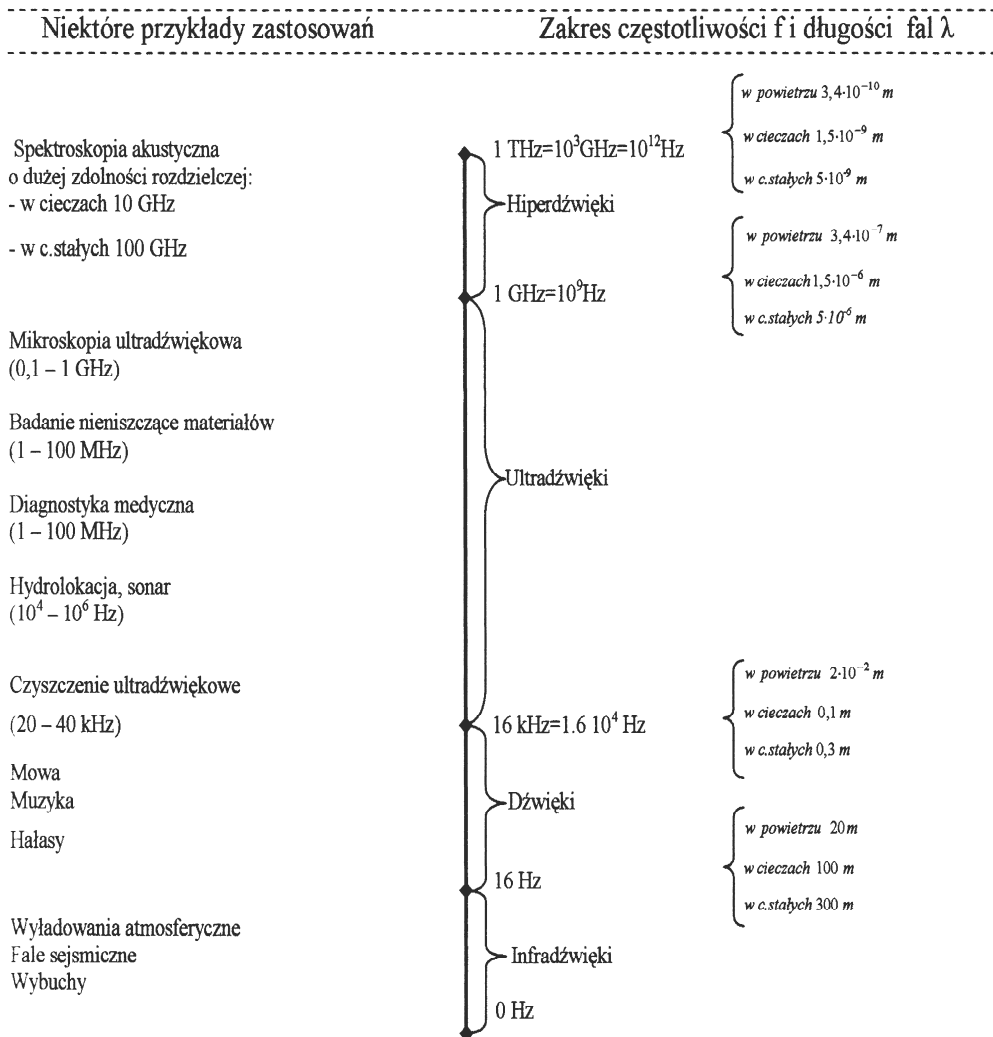


4. Diagnostyka ultradźwiękowa

Podstawową przesłanką rozwoju defektoskopii wykorzystującej zjawiska akustyczne jest fenomen procesów akustycznych powszechnie obecny w środowisku naturalnym i łatwowzbudzalny w laboratoriach, na stanowiskach badawczych. Fizyczna natura procesów akustycznych polega na propagacji mechanicznej fali stanowiącej zaburzenie równowagowego stanu ośrodka materialnego. Falowy charakter tego zaburzenia wynika z konstytutywnych własności ośrodka, w szczególności odkształcalności oraz powiązania stanu deformacji ze stanem obciążeń wewnętrznych, czy też z energią odkształcenia. Postać tych związków zależy od fizycznej natury wzajemnych oddziaływań elementów strukturalnych ośrodka i jest różna w ośrodkach różniących się stanem skupienia, budową wewnętrzną, natomiast w danym ośrodku zależy od rozkładu cech strukturalnych energii wewnętrznej. Stąd wpływ wymienionych cech ośrodka na charakterystyki procesu propagacji fal akustycznych w ośrodku. Obserwacja przebiegu procesu akustycznego w ośrodku może być zatem źródłem informacji o stanie ośrodka, jego strukturze i własnościach. W badaniach akustycznych wykorzystuje się wpływ własności sprężystych i jednorodności struktury materiału na rozchodzenie się fal dźwiękowych [20,41,40,92,95,128,132,174,178,187]. Badanie tego wpływu opiera się na obserwacji rodzaju fal, ich natężenia i zmian kierunku propagacji fal w badanym materiale oraz na pomiarach czasu przejścia fal przez materiał. Na tej podstawie można określić wtórne charakterystyki procesu, takie jak prędkość rozchodzenia się fal poszczególnego typu czy miary rozpraszania energii fali - współczynniki tłumienia. Należy przy tym mieć na uwadze anizotropowość tych charakterystyk, odpowiadającą anizotropowości własności fizycznych ośrodka oraz ich lokalność przy niejednorodności badanego ośrodka.

Wobec znacznej złożoności procesów akustycznych, ze względów metodologicznych, ich diagnostyczne wykorzystanie opiera się na ogół na aktywacji procesów diagnostyczno-pomiarowych w umownych, dających się opisać i zidentyfikować warunkach. Umowność dotyczy przede wszystkim etapu wzbudzenia fali. Najistotniejszą okolicznością określającą przebieg procesu badań jest rodzaj wzbudzonej fali, w szczególności jej długość lub odpowiadająca jej częstotliwość.

Na rysunku 4.1 przedstawiony jest pełny zakres częstotliwości fal sprężystych, jakie obserwuje się w przyrodzie lub są możliwe do wytworzenia technicznie. Jest to zakres bardzo szeroki w porównaniu z obszarem obejmującym dźwięki słyszalne (16 Hz - 16 kHz).



Rysunek 4.1. Widmo fal sprężystych – zakres częstotliwości i długości fal odpowiadający różnym zjawiskom i zastosowaniom [187]

Obszar częstotliwości poniżej 16 Hz obejmuje infradźwięki - poddźwięki. Górna granica słyszalności, przyjęta umownie jako częstotliwość 16 kHz (niekiedy przyjmuje się 20 kHz), wyznacza dolną granicę obszaru ultradźwiękowego. Fale sprężyste wytwarzane powyżej tej częstotliwości mogą być rejestrowane (odbierane) różnymi urządzeniami, jednakże nie są już rejestrowane przez ucho ludzkie. Ultradźwiękami określa się fale sprężyste o częstotliwościach

do 10^9 Hz. Fale sprężyste o większych częstotliwościach, które występują w sposób naturalny jako fale ciepłe związane z drganiami cząsteczek ośrodka i atomów w sieci krystalicznej, nazwano hiperdźwiękami. Hiperdźwiękowy zakres fal sprężystych, sięgający do granicznej wartości częstotliwości rzędu 10^{13} Hz, jest wyznaczony przez minimalną długość fali porównywalną z odstępami międzyatomowymi. Na rysunku 4.1 przedstawiono w poglądowej skali wartości częstotliwości rozgraniczające poszczególne obszary fal sprężystych, a po prawej stronie tej skali - odpowiadające im długości fal dla podstawowych trzech stanów skupienia: ciał stałych, cieczy i gazów (na przykładzie powietrza).

Podstawowa relacja wiążąca częstotliwość f drgań cząstki ośrodka z długością λ rozchodzącej się w nim fali jest następująca :

$$\lambda = c/f, \quad (4.1)$$

gdzie: c - jest charakterystyczną dla danego ośrodka i dla danego rodzaju fal prędkością rozchodzenia się fali akustycznej.

W ogólnym przypadku prędkość ta może zależeć od częstotliwości. W przypadku fal podłużnych w powietrzu prędkość $c = 340$ m/s, w cieczach jest ona rzędu 1500 m/s, a w ciałach stałych ok. 5000 m/s (np. w stali).

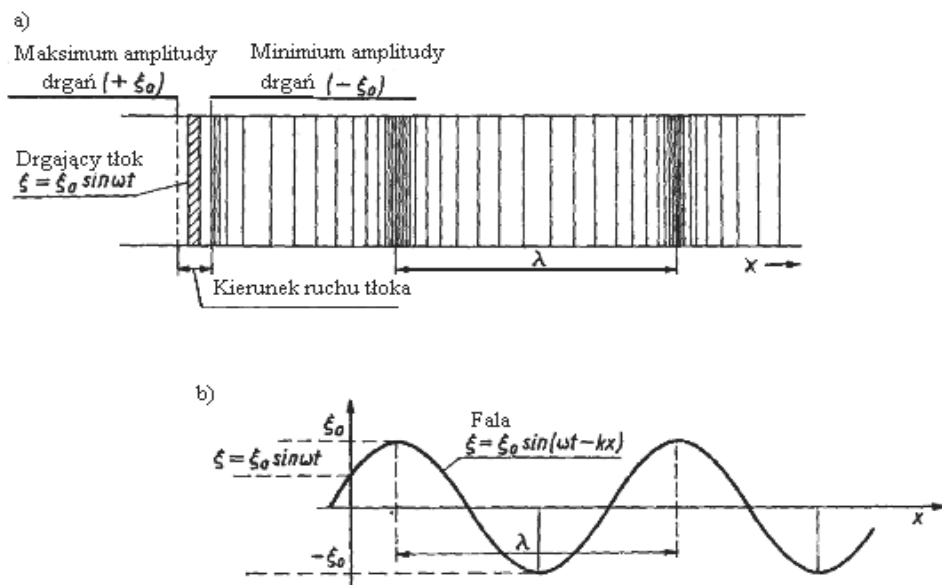
Biorąc pod uwagę rozpraszanie energii ruchu falowego rozróżnia się ośrodki idealne (bezstratne, niedyssypatywne), w których fale nie ulegają tłumieniu i ośrodki rzeczywiste (stratne, dyssypatywne), w których energia fal na drodze propagacji ulega tłumieniu (zamianie na ciepło).

W ośrodkach rzeczywistych mogą wystąpić także niejednorodności pochodzące od defektów struktury, zanieczyszczeń obecnych w materiale, naprężeń wewnętrznych i innych czynników. Skala obszarów tych zaburzeń nadaje im charakter mikro- lub makro niejednorodności, przy czym kryterium podziału określa stosunek ich charakterystycznych wymiarów do długości fal, których zachowanie w ośrodku podlega analizie. Niejednorodności ośrodka w mniej lub bardziej zasadniczy sposób wpływają na obraz wzbudzonej fali akustycznej. Wpływ ten określa się jako rozpraszanie fal na niejednorodnościach.

W wielu przypadkach rozpatrywanych w akustyce ośrodek, w którym rozchodzą się fale sprężyste, może być traktowany jako ciągły [227]. Opis taki nazywa się klasycznym i jest wystarczającym przybliżeniem modelowym do badania procesów akustycznych w zakresie dźwięków słyszalnych. Jest on jednak na ogół niewystarczający dla ultradźwięków

o dużych mocach i dużych częstotliwościach, w szczególności hiperdźwięków, gdzie musi być brana pod uwagę nieciągła struktura ośrodka. W odniesieniu do gazów adekwatność modelu ciągłego ograniczona jest relacją średniej drogi swobodnej cząsteczek pomiędzy zderzeniami, a w odniesieniu do cieczy i ciał stałych stosunkiem odległości międzycząsteczkowych czy międzyatomowych do długości fali dźwiękowej [39].

Do celów praktycznych ośrodki rzeczywiste można traktować z dobrym przybliżeniem jako idealne, gdy osłabienie fal (pochodzące od tłumienia i rozpraszania) na rozpatrywanej drodze rozchodzenia się jest, w aspekcie celu prowadzonych badań, pomijalnie małe. Można wtedy posłużyć się opisem klasycznym. W wielu przypadkach w ośrodkach rzeczywistych stwierdza się odstępstwo od opisu klasycznego i wtedy miary tego odstępstwa można traktować jako charakterystyki danego ośrodka.



Rysunek 4.2. Fala sprężysta: a) płaska fala podłużna wzbudzona ruchem tłoka, b) zmiany wychYLENIA fali monochromatycznej biegnącej w kierunku x [39]

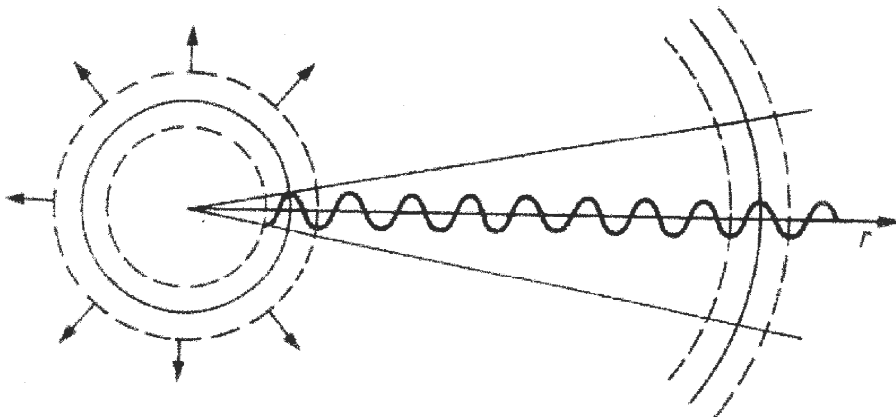
Opis klasyczny rozchodzenia się fal sprężystych polega na przyjęciu założenia o ciągłości materii bez wnikania w jej ziarnistą strukturę (atomową, cząsteczkową, polikrystaliczną). Konsekwencją założenia ciągłości ośrodka jest możliwość lokalnego opisu i analizy bardzo małych obszarów objętości o własnościach lokalnych ośrodka. Wykorzystuje się reprezentację

ośrodka jako złożonego z małych, w porównaniu z długością fali, tzw. cząstek akustycznych. W ośrodku niezaburzonej każda z jego cząstek znajduje się w spoczynku, natomiast w ośrodkach zaburzonych cząstki poruszają się. Źródłem zaburzenia może być dowolne lokalne wymuszenie ruchu tych cząstek. Zaburzenie rozchodzące się w ośrodku, takie jak na rysunku 4.2, którego źródłem jest drgająca płaszczyzna (płaska powierzchnia tłoka) stanowi falę płaską. Wówczas gdy źródłem fali jest drgająca powierzchnia dowolnego kształtu, fala ma odpowiednio postać uformowaną przez tę powierzchnię. Gdy, przykładowo, powierzchnią drgającą jest powierzchnia kuli, w ośrodku powstanie fala kulista.

Na rysunku 4.3 przedstawiono sferę pulsującą „zanurzoną” w ośrodku sprężystym, tak zwane źródło zerowego rzędu.

Zarówno fala wytwarzana przez tłok, jak i fala wytwarzana przez kulę pulsującą ma charakter fali podłużnej, czyli ruchu falowego ośrodka, w którym kierunek ruchu cząstek jest równoległy do kierunku rozchodzenia się fali. Występuje w tym wypadku lokalne odkształcenie objętościowe ośrodka.

Wtedy gdy w ośrodku można wywołać odkształcenie postaciowe, kierunek ruchu punktów powierzchni źródła styczny do tej powierzchni, wywołujący zgodny z tym kierunkiem ruch cząstek ośrodka, powoduje powstanie fali poprzecznej, czyli ruchu ośrodka, w którym kierunek prędkości cząstek jest prostopadły do kierunku propagacji fali. Jest to możliwe w ciałach stałych lub w płynach lepkich. W płynach nielepkich możliwe są tylko odkształcenia objętościowe, mogą się w nich więc rozchodzić jedynie fale podłużne.



Rysunek 4.3. Sfera pulsująca jako źródło fali kulistej (źródło zerowego rzędu) [39]

Na rysunku 4.4 pokazano postacie odkształcenia cząstki akustycznej w ciele stałym w falach podłużnych i falach poprzecznych w ujęciu jednowymiarowym (rys. 6.4. a, b) oraz trójwymiarowym (rys. 4.4. c, d). Zaburzenie falowe rozchodzi się tak, że każda cząstka ośrodka, wykonując ruch drgający wokół położenia równowagi, przekazuje energię cząstkom sąsiednim, które rozpoczynają i realizują ruch drgający z odpowiednim przesunięciem czasowym. Fazy ruchu powtarzają się okresowo w przestrzeni, w odległości równej długości fali λ oraz w czasie z okresem T - rysunek 4.4, przy czym

$$\lambda = c \cdot T \quad (4.2)$$

gdzie c jest prędkością fazową fali [39].

Ze względu na diagnostyczną efektywność procesów akustycznych najczęściej wykorzystuje się częstotliwości fal odpowiadające falom ultradźwiękowym.

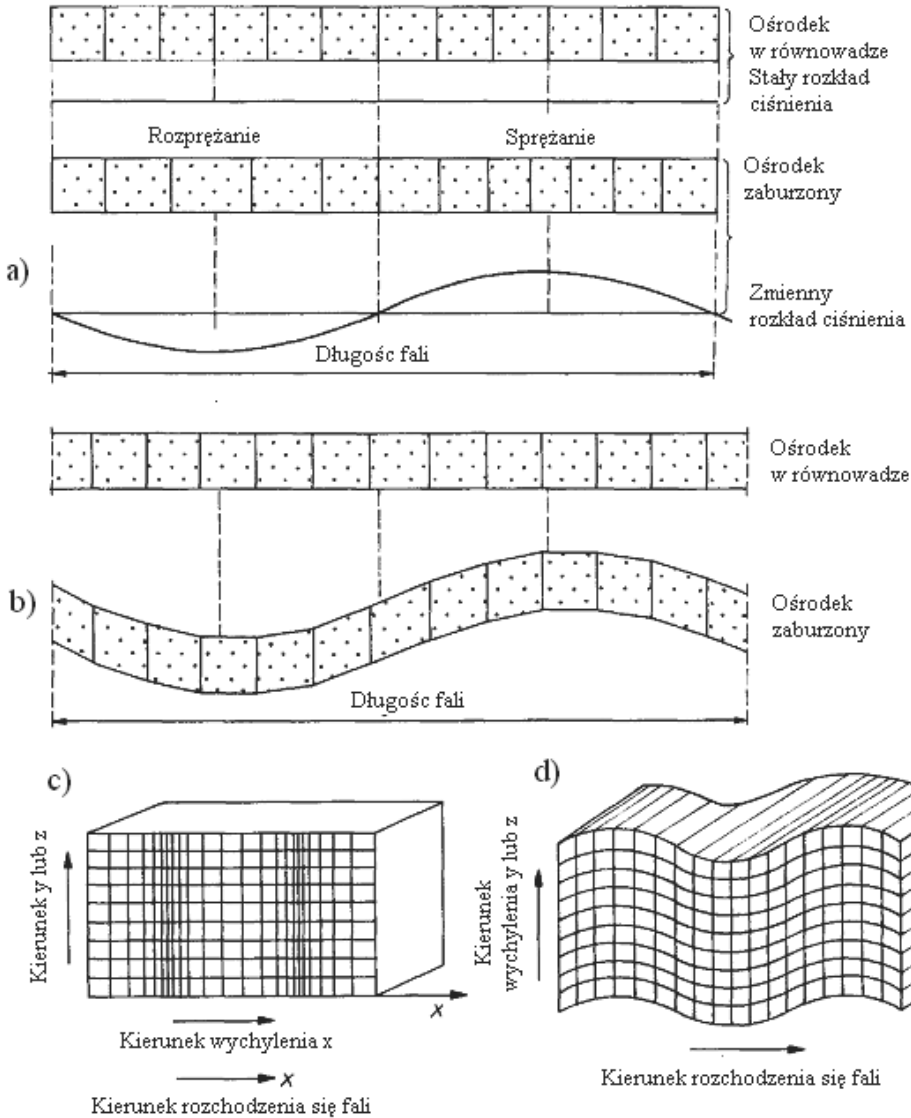
Źródłami fal akustycznych, w szczególności ultradźwiękowych, w ośrodku materialnym, są mechaniczne układy drgające „zanurzone” w tym ośrodku lub do niego przylegające. Energia drgań tych układów zostaje zamieniona na energię fali akustycznej. Emitowana przez źródło fala ma na powierzchni granicznej źródło - ośrodek taką samą częstotliwość drgań lub, w przypadku fali złożonej, taki sam zbiór częstotliwości jak źródło. Dla postaci wzbudzonej w ośrodku fali podstawowe znaczenie ma kształt i rozmiar powierzchni źródła w stosunku do długości fali.

Przykładem prostej formy geometrycznej aktywnej powierzchni źródła jest pulsująca sfera, omówiona już wcześniej (rys. 4.3), która jest źródłem fali kulistej w izotropowym ośrodku jednorodnym. Układ taki jest równoważny hipotetycznemu źródłu punktowemu, które można wyobrazić sobie jako granicznie małą sferę pulsującą dla $r \rightarrow 0$, gdzie r to promień sfery. Drgania odbywają się w ten sposób, że promień sfery zmienia się okresowo z określoną pulsacją, przy czym środek sfery pozostaje nieruchomy.

Bardziej złożonymi układami promieniującymi są źródła pierwszego rzędu, zwane również dipolem akustycznym, czyli źródłem podwójnym, a dalej tzw. kwadrupol, stanowiący układ poczwórny, zwany źródłem drugiego rzędu. Kwadrupol akustyczny jest kombinacją czterech sfer pulsujących lub, co jest równoważne, dwóch dipoli akustycznych [16].

W praktyce diagnostycznej do pobudzania fal wykorzystywane są najczęściej tzw. głowice, ze względu na częstość emitowanych fal nazywane ultradźwiękowymi. Ich podstawowe parametry to częstotliwość generowanego impulsu, moc, rodzaj wzbudzonej fali oraz cechy

geometryczne obszaru propagacji. Głowice te pełnią również rolę odbiorników diagnostycznych sygnałów akustycznych.



Rysunek 4.4. Schematyczne przedstawienie deformacji cząstki akustycznej w przypadku jednowymiarowym: fala podłużna (a), fala poprzeczna (b) oraz w ujęciu trójwymiarowym (c,d) [39]

Ważną cechą źródła fali akustycznej jest impedancja promieniowania. Przyjmując mały element drgający powierzchni ΔS dowolnego źródła, oznacza się prędkość drgań mechanicznych elementu powierzchni jako \dot{x} . Na powierzchni elementu cząsteczki ośrodka uzyskują prędkość akustyczną u , która na powierzchni źródła równa się co do wartości prędkości drgań tej powierzchni, a więc $u = \dot{x}$. Na element ΔS działa z jednej strony siła mechaniczna F , a z drugiej strony siła akustyczna $p\Delta S$ jako reakcja, gdzie p - ciśnienie akustyczne. Siły te są w każdej chwili w równowadze, więc $F = p\Delta S$.

Impedancja mechaniczna obciążająca element ΔS źródła drgań jest równa:

$$z_m = \frac{F}{\dot{x}} = p \frac{\Delta S}{\dot{x}} = p \frac{(\Delta S)^2}{\dot{x}\Delta S} = p \frac{(\Delta S)^2}{u} = Z_\alpha (\Delta S)^2 \quad (4.3)$$

gdzie: $Z_\alpha = p/u$ jest impedancją akustyczną, którą w tym wypadku nazywa się impedancją akustyczną promieniowania.

Widać więc, że między impedancją mechaniczną, a impedancją akustyczną istnieje sprzężenie za pośrednictwem powierzchni ΔS . Impedancja akustyczna promieniowania jest wielkością zespoloną $Z_\alpha = R + jX$ i składa się z części rzeczywistej R - opór czynny (rezystancja) oraz części urojonej X - opór bierny (reaktancja). Opór czynny promieniowania jest związany z częścią energii źródła, przekazywanej do ośrodka, natomiast opór bierny z energią pulsującą, która w ciągu każdego okresu na przemian przechodzi, wskutek pracy wykonanej siłą parcia, do ośrodka i powraca na powierzchnię źródła. Zespolona postać impedancji akustycznej Z_α pozwala stwierdzić fakt, że prędkość i siła reakcji środowiska są przesunięte w fazie o pewien kąt δ , przy czym [39]:

$$\text{tg } \delta = \frac{X}{R} \quad (4.4)$$

Przykładowo opór czynny promieniowania dla źródła prostego (kula pulsująca) w ośrodku jednorodnym określa zależność:

$$R = \rho c S \cdot \frac{\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^2}{1 + \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^2} \quad (4.5)$$

gdzie: ρc - jest impedancją akustyczną właściwą ośrodka, $S=4\pi r^2$ - polem powierzchni kuli, r - promieniem kuli, λ - długością promieniowanej fali dźwiękowej.

Średnią wartość czynnej mocy akustycznej P_a , jaką promieniuje źródło, można obliczyć ze wzoru:

$$P_a = \frac{1}{2} R u_m^2 \quad (4.6)$$

gdzie: u_m jest amplitudą prędkości cząstki akustycznej.

Opór bierny (reaktancja) dla kuli pulsującej ma postać:

$$X = \rho c S \cdot \frac{\frac{2\pi r}{\lambda}}{1 + \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^2} \quad (4.7)$$

Najdogodniejsze warunki do emisji energii akustycznej przez źródło (wydzielenie się jej na oporze rzeczywistym R) mają miejsce wtedy, gdy $R > X$, co, jak wynika ze wzorów (4.6) i (4.7), jest spełnione wtedy jak $2\pi r/\lambda > 1$, czyli wówczas, gdy promień kuli pulsującej jest większy od długości fali promieniowanej.

Z postaci wzoru (4.5) oraz ze wzoru (4.7) wynika, że średnia moc akustyczna emisji przez źródło jest proporcjonalna do właściwego oporu akustycznego środowiska i do powierzchni S . Moc przekazywana do ośrodka jest więc tym większa, im większy jest iloczyn ρc dla danego ośrodka. Jest to zgodne z doświadczeniem wykazującym, że lepsze są warunki emisji dźwięku w wodę aniżeli w powietrze, ponieważ dla powietrza $\rho c = 415 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (w temperaturze 20°C), a dla wody $\rho c = 14,4 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (w temperaturze 13°C) [16]. Ma to konsekwencję w praktyce w zaleceniach dotyczących sposobów prowadzenia badań. W celu zapewnienia właściwej jakości sygnału stosuje się płynne ośrodki sprzęgające dwie powierzchnie: pierwszą aktywną głowicy i drugą pobudzaną badanego obiektu.

W ośrodku rzeczywistym fala akustyczna ulega tłumieniu (osłabieniu). Przyczyną jest nieodwracalność rzeczywistych procesów akustycznych (wzrost entropii), co przejawia się absorpcją fal ultradźwiękowych, która powoduje tłumieniowy spadek amplitudy fali, a więc również jej energii, wzdłuż drogi rozchodzenia fali. Ze wzrostem częstotliwości fali absorpcja

wzrasta, w niektórych obszarach częstotliwości bardzo silnie, tak że już w odległości porównywalnej z długością fali zmiany amplitudy są znaczne. Również prędkość rozchodzenia się fali zależy od częstotliwości. Ten efekt nazywa się dyspersją fal akustycznych lub dyspersją dźwięku (najczęściej występuje ona w zakresie ultradźwiękowym). W cieczech i ciałach stałych dyspersję można w wielu przypadkach pominąć, zwłaszcza przy małych częstotliwościach, natomiast w gazach występuje ona bardzo silnie już przy częstotliwości rzędu dziesiątków lub setek kiloherców.

Na przebieg zjawisk akustycznych w ośrodku rzeczywistym w sposób zasadniczy wpływa również niejednorodność ośrodka. Biorąc pod uwagę rozchodzenie się fal, istotna jest skala obszarów zaburzeń jednorodności w stosunku do długości fali. W ośrodkach niejednorodnych propagacji fal towarzyszą efekty rozpraszania i dyfrakcji, co jest także przyczyną osłabiania sygnału. Gdy długość fali staje się porównywalna z rozmiarem niejednorodności, ośrodek nie można już traktować jako ciągłego. Wielkości efektów rozpraszania i dyfrakcji w zastosowaniach ultradźwięków są istotną informacją do rozpoznania niejednorodności ośrodków, co wykorzystywane jest w defektoskopii ultradźwiękowej.

Kolejną przyczyną odstępstw od praw propagacji fali w ośrodku liniowo lepkosprężystym może być przekroczenie amplitudy drgań cząstek ośrodka poza zakres liniowości. Ma to miejsce w praktyce zwłaszcza w zakresie ultradźwiękowym. Występują wówczas procesy nieliniowe polegające na zniekształceniu postaci fali oraz powstaniu ciśnienia promieniowania fali wywieranego przez czoło fali na ośrodek. Powoduje ono translacyjny przepływ ośrodka w kierunku rozchodzenia się fali, tzw. „wiatr akustyczny”.

Efekt tłumienia fali wzdłuż drogi rozchodzenia się charakteryzowany jest za pomocą amplitudowego lub energetycznego współczynnika tłumienia.

Amplitudowy współczynnik tłumienia α określa względny zanik amplitudy na jednostkę przebytej przez falę drogi.

$$\frac{dA}{A} = -\alpha dx \quad (4.8)$$

Energetyczny współczynnik tłumienia γ definiuje się analogicznie jako względny zanik natężenia fali na jednostkę przebytej drogi.

$$\frac{dI}{I} = -\gamma dx \quad (4.9)$$

Po scałkowaniu obu tych równań (4.8) i (4.9) otrzyma się wyrażenia:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (4.10)$$

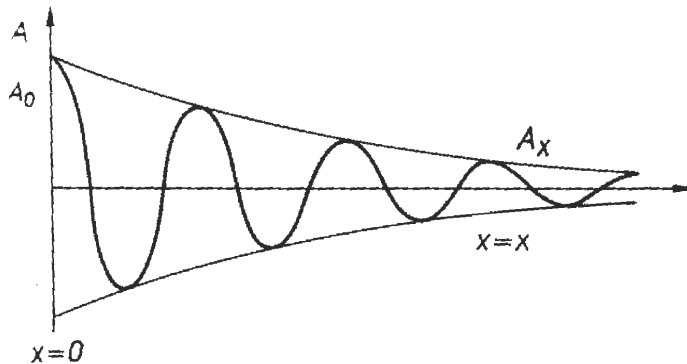
$$I = I_0 e^{-\gamma x} \quad (4.11)$$

gdzie: A_0 i I_0 są odpowiednio początkową wartością amplitudy i natężenia dla $x = x_0 = 0$, a więc dla punktu, od którego rozpoczyna się obserwację (rys. 4.5).

Natężenie fali jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy, a więc:

$$I \sim A^2 = A_0^2 e^{-2\alpha x} \quad (4.12)$$

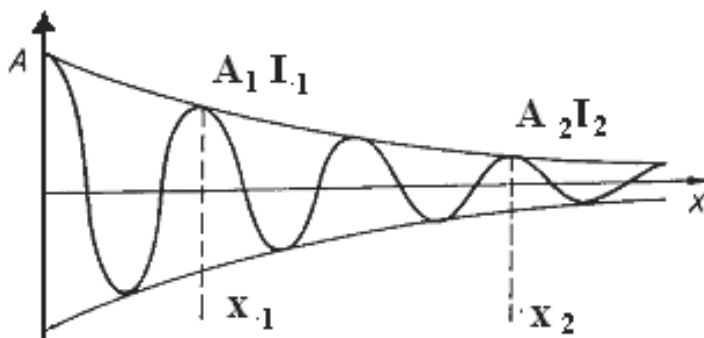
czyli: $\gamma = 2\alpha$.



Rysunek 4.5. Objaśnienie do definicji współczynnika pochłaniania fali ultradźwiękowej [178]

W wyrażeniu (4.10) A oznacza amplitudę dowolnej płaskiej fali sprężystej, czyli odpowiednio: dla przesunięcia cząstki $A = \zeta_0$, dla prędkości cząstki $A = u_0$, dla ciśnienia akustycznego $A = p_0$, dla potencjału $A = \Phi_0$.

Tłumienie fal jest wielkością charakterystyczną w danym ośrodku podobnie jak prędkość rozchodzenia się c i jest przedmiotem bezpośredniego pomiaru. Wyznaczenia współczynnika tłumienia dokonuje się na podstawie pomiaru amplitudy lub natężenia w dwóch różnych miejscach na drodze rozchodzenia się fali, w znanej odległości od siebie (rys. 4.6).



Rysunek 4.6. Wyznaczenie współczynnika tłumienia przez pomiar amplitud lub natężeń w dwóch odległościach od źródła x_1 i x_2 [178]

Przykładowo, jeśli A_1 oznacza amplitudę fali w miejscu x_1 , to amplitudę A_2 w miejscu x_2 określa zależność:

$$A_2 = A_1 e^{-\alpha(x_2 - x_1)}, \quad (4.13)$$

skąd:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (4.14)$$

W przypadku, gdy wielkością mierzoną jest natężenie fali, to odpowiednio

$$\alpha = \frac{1}{2(x_2 - x_1)} \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (4.15)$$

Wymiarem α jest m^{-1} . Z uwagi na logarytmiczny charakter tych wzorów współczynnik tłumienia α wyraża się czasem w neperach/m (Np/m), częściej jednak przechodzi się od logarytmów naturalnych do dziesiętnych i używa jako jednostek decybeli/m (dB/m), przy czym $1 \text{ Np} = 8,686 \text{ dB}$.

Fizyczne przyczyny spadku energii fali w ośrodku to zjawiska absorpcji energii i zamiany na ciepło spowodowane lepkością ośrodka oraz wpływem procesów molekularnych. Inną przyczyną jest rozpraszanie fali zachodzące na niejednorodnościach ośrodka. Z reguły wyznaczany doświadczalnie współczynnik tłumienia wg wyżej podanej procedury uwzględnia oba efekty. Analityczną dyskusję wpływu lepkości na prędkość propagacji fali przytoczono w pracy [39].

Molekularna teoria rozchodzenia się dźwięku odwołuje się do tzw. relaksacji pomiędzy stanami energii translacyjnej (związanej z zewnętrznymi stopniami swobody) cząsteczek wieloatomowych i stanami energii wewnętrznej (związanej z wewnętrznymi stopniami swobody). Wprowadzone modele przepływu energii pomiędzy składowymi ruchami cząstek, odpowiadającymi wyróżnionym stopniom swobody, pozwoliły wyznaczyć zależności prędkości rozchodzenia się i tłumienia ultradźwięków od częstotliwości i czasu relaksacji. Relaksacja towarzysząca wymianie energii między zewnętrznymi i wewnętrznymi stopniami swobody cząstek ośrodka nazywa się relaksacją termiczną i występuje na przykład przy wymuszaniu falą ultradźwiękową zmian struktury cząsteczkowej bądź przegrupowaniu atomów o charakterze reakcji chemicznych. Procesy relaksacji skutkują opóźnieniem reakcji zaburzonego ośrodka w stosunku do przyczyny - zaburzenia (fali ultradźwiękowej) o pewien czas, nazwany czasem relaksacji. Wynikiem tego opóźnienia jest przesunięcie fazy między falą wzbudzącą a reakcją ośrodka, powodujące dodatkową absorpcję (tłumienie) fali akustycznej. Energia, która wzbudziła układ cząsteczkowy, jest oddawana z opóźnieniem wywołującym przesunięcie fazowe uniemożliwiające pełne odzyskanie absorbowanej energii. Procesom relaksacji ultradźwiękowej towarzyszy zwykle dyspersja prędkości dźwięku. Jest ona wynikiem faktu, że dla różnych częstotliwości wspomniane wyżej opóźnienia fazowe są różne.

Badania różnych substancji w celu wyznaczenia częstotliwościowych zależności c i λ i znalezienia dyskretnej wartości f_r i μ_{\max} , które umożliwiają wyznaczenie energii aktywacji oraz parametrów kinetycznych procesów molekularnych, stanowią przedmiot tzw. spektroskopii ultradźwiękowej.

Spektroskopia ultradźwiękowa, zarówno fal podłużnych jak i poprzecznych (dla bardzo lepkich cieczy), w zakresie częstotliwości od 100 kHz do kilku GHz, umożliwia badanie fizykochemicznych własności cieczy i polimerów, w szczególności określanie kinetyki bardzo szybkich procesów relaksacji strukturalnej, a także relaksacji lepko-sprężystej i wielu innych [39].

W ośrodkach niejednorodnych dodatkową, obok absorpcji, przyczyną osłabienia (tłumienia) fal sprężystych są efekty ich rozpraszania i dyfrakcji, czyli ugięcia.

Niejednorodności ośrodka stanowią lokalne przeszkody dla propagacji fali i ich oddziaływanie z falą pierwotną powoduje, że pojawiają się wtórne fale odbite i rozproszone, przy czym następuje to w różnych kierunkach z uwagi na ograniczone rozmiary przeszkód.

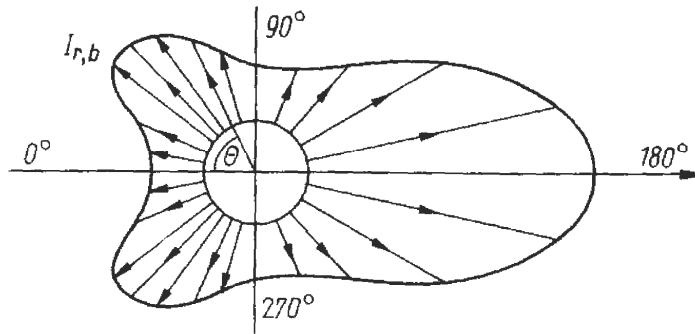
Nałożenie się fal rozproszonych na falę pierwotną powoduje, w wyniku interferencji, zmiany jej natężenia, a także zmiany kierunku (ugięcie). Rozpraszanie fali w ośrodku niejednorodnym jest wynikiem oddziaływania fali z wieloma przeszkodami na ogół o różnych rozmiarach i znajdujących się w różnych odległościach od siebie. W przypadku, gdy rozmiary przeszkód (elementów rozpraszających) są równe, centra rozpraszające tworzą periodyczną sieć przestrzenną i wtedy efekty rozpraszania fali mają charakter regularnej dyfrakcji, wynikającej z konstruktywnych i destruktywnych interferencji fal rozproszonych na periodycznej strukturze przestrzennej. Struktury przestrzennie periodyczne stanowią osobną klasę ośrodków i na ogół nie zalicza się ich do ośrodków niejednorodnych, przez które rozumie się takie, gdzie centra rozpraszające mają albo różne rozmiary, albo różne odległości. W szczególności centra mogą mieć równe rozmiary, ale są rozmieszczone chaotycznie w przestrzeni. Opisuje się takie ośrodki, określając rozkład statystyczny rozmiarów niejednorodności i rozkład statystyczny odległości między nimi. Niejednorodności ośrodka opisuje się często jako wielkości odchyień od wartości średnich (fluktuacji) lokalnych własności ośrodka. Mogą one mieć charakter przestrzenny lub czasowy [39].

Jak już wcześniej stwierdzono, efekt rozpraszania fal sprężystych w sposób istotny zależy od stosunku rozmiarów obiektu, na którym następuje rozproszenie, do długości fali padającej X , która jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości. Charakter rozpraszania wynikający z oddziaływania fali z obiektami rozpraszającymi jest zupełnie inny w przypadkach, gdy $D \ll \lambda$, $D \approx \lambda$ lub $D \gg \lambda$ (D -poprzeczny rozmiar przeszkody).

W pierwszym przypadku, dla $D \ll \lambda$, wyrażenie na funkcję rozpraszania obliczył Rayleigh. Jego znany wzór dla kulistych cząstek rozpraszających charakteryzuje się tym, że funkcja rozpraszania $\varphi_R(\theta_r)$ jest proporcjonalna do czwartej potęgi częstotliwości (odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi długości fali).

Wówczas gdy $D \gg \lambda$, funkcje rozpraszania zależą silnie od kształtu obiektów rozpraszających, a także od ich własności materiałowych. Rozpatruje się najczęściej kształty sferyczne oraz walcowe i traktując je jako obiekty sztywne, sprężyste lub podatne na wymuszenie przez falę padającą, otrzymuje się różne rozwiązania w zależności od różnych warunków oddziaływania. Jeżeli długość fali jest dużo większa od rozmiarów obiektu rozpraszającego, to różne jego fragmenty zostają pobudzone w różnych fazach ruchu falowego, wewnątrz obiektu powstają fale wymuszone i, w zależności od kształtu, fale stojące.

Emitowane na zewnątrz przez obiekt fale wtórne (rozproszone) mogą przyjmować różne charakterystyki kierunkowe. Jako najprostszy przykład rozpraszania w przypadku $D \gg \lambda$ rozpatruje się zwykle rozproszenie fali płaskiej na sztywnej kuli o promieniu $r_0 \gg \lambda$ (rys. 4.7).



Rysunek 4.7. Geometria rozpraszania fali na kuli [178]

Przypadek, gdy $D \gg \lambda$, jest szczególnie ważny z uwagi na występowanie w tych warunkach silnych efektów dyfrakcyjnych i rezonansowych. Te ostatnie powodują, że przekrój czynny na rozpraszanie przy rezonansie może być nawet wielokrotnie większy od przekroju geometrycznego. Przykładem tego jest rozpraszanie na kulistych pęcherzykach gazowych (nie są to kule sztywne) występujących w wodzie. Pęcherzyki takie różnią się znacznie własnościami akustycznymi od otaczającej je cieczy, dlatego też ich rezonans występuje, gdy ich wielkość (średnica) jest znacznie mniejsza od długości fali w wodzie.

Przekrój czynny na rozpraszanie przez pęcherzyk gazu o promieniu r_0 w wodzie można wyrazić następującym wzorem [178]:

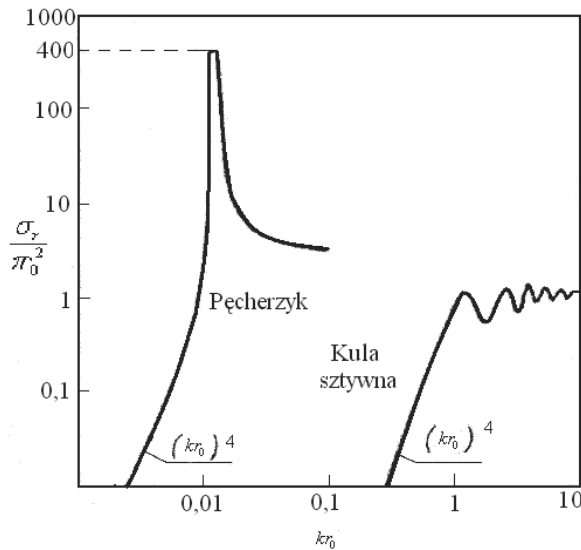
$$\sigma_r = 4\pi \frac{|p_r|}{|p_i|} = \frac{4\pi r_0^2}{\left[\left(\frac{f_r}{f} \right)^2 - 1 \right]^2 + \delta} \quad (4.16)$$

gdzie: p_r i p_i są amplitudami ciśnienia akustycznego fali rozproszonej i fali padającej (odpowiednio), f - częstotliwością fali, f_r - częstotliwością rezonansową pęcherzyka, δ - współczynnikiem tłumienia pęcherzyka w danym ośrodku.

Względny współczynnik rozpraszania $\frac{\sigma_r}{A_n} = \frac{\sigma_r}{\pi_0^2}$ ma bardzo charakterystyczny przebieg w zależności od częstotliwości i ma maksimum dla $f = f_r$. Na wykresie (rys. 4.8) jest wykreślony względny przekrój czynny w jednostkach $kr_0 = \frac{2\pi r_0}{\lambda}$. Pierwszy wykres odnosi się do pęcherzyka, natomiast drugi do kuli sztywnej. Na obydwu wykresach widać także, w lewej dolnej części, zależność dla $kr_0 \ll 1$, a więc przypadek, gdy obiekt jest bardzo mały w porównaniu z długością fali. W tym obszarze obowiązuje prawo Rayleigha na rozpraszanie $\sigma_r \sim \frac{1}{\lambda^4} \sim (k_0)^4$, co oznaczono na rysunku 4.8. Na wykresie dla pęcherzyka widać bardzo dużą rezonansową wartość przekroju czynnego, kilkaset razy przewyższającą wartość przekroju geometrycznego, do której dąży σ_r dla $f \gg f_r$. Ze wzoru (4.16), dla rezonansu ($f = f_r$)

$$\sigma_{r, rez} = \frac{4\pi_0^2}{\delta} \quad (4.17)$$

Na podstawie tego wzoru i pomiaru rozpraszania ultradźwięków można określać rozmiar pęcherzyków w badanej cieczy.



Rysunek 4.8. Rozpraszanie ultradźwięków na pęcherzyku gazowym [178]

Inne przykłady efektów rozpraszania wielokrotnego ukazują obrazy (rys. 4.9), które są wynikiem symulacji komputerowych dla modelu płyt wytworzonych z materiału kompozytowego wzmocnionego włóknami polimerowymi. W modelu włókna wzmocnienia traktowane są jako równe walce ułożone równolegle we wzajemnej odległości osi sąsiednich walców trzykrotnie większej od promienia włókna.

Na rysunku 4.9 przedstawiono wyniki rozpraszania dotyczące płytki jednego rozmiaru 2×4 przy różnych wartościach parametru ka , gdzie $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ - długość fali, a - promień włókna.

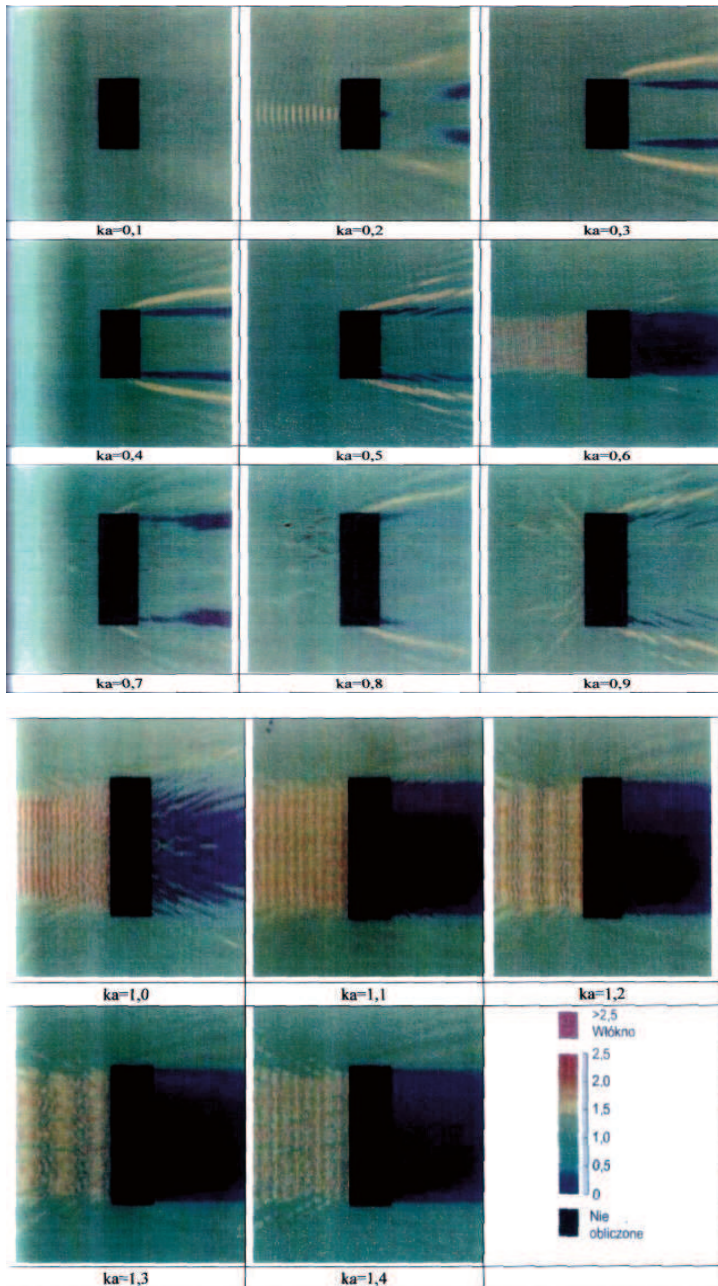
Widoczne zmiany wynikają z różnych wartości przyjętego wyróżnika - iloczynu ka . Wzięty pod uwagę zakres zmian wartości obejmuje przedział $ka < 1$ przez $ka \approx 1$ aż do $ka > 1$. Kierunek propagacji fali ultradźwiękowej, padania na próbkę - od lewej strony. Widać efekty rozpraszania do przodu i do tyłu oraz efekty interferencyjne i dyfrakcyjne [39,132].

Techniczną aplikację metody ultradźwiękowej diagnostyki stanu materiałów inżynierskich umożliwiają urządzenia generujące oraz odbierające i analizujące fale akustyczne. Do podstawowych należą wspomniane wcześniej głowice ultradźwiękowe, których zasadniczym elementem jest przetwornik, w którym sygnał akustyczny jest wytwarzany w wyniku transformacji, najczęściej sygnału elektrycznego na zasadzie piezoelektrycznej. Urządzenia te pozwalają jednocześnie na modelowanie generowanego pola akustycznego oraz czasowego procesu jego kształtowania.

Głowice pełnią zatem rolę generatora lub nadajnika, gdzie przetwarza się energię pierwotną w energię fali ultradźwiękowej. Mogą również spełniać funkcję odbiornika fal ultradźwiękowych, przetwarzając je w podlegający dalszej obróbce, rejestracji i analizie sygnał.

Nadajniki i odbiorniki nazywane są przetwornikami ultradźwiękowymi. Często są one odwracalne, to znaczy, że ten sam układ może działać albo jako nadajnik, albo jako odbiornik, chociaż na ogół nie zawsze z taką samą sprawnością (czułością) w obie strony. Z uwagi na tę ostatnią cechę niektórych przetworników metody przetwarzania również dzieli się na odwracalne i nieodwracalne. Do metod nieodwracalnych należą między innymi metody mechaniczne, aero- i hydromechaniczne, termiczne i optyczne, do metod odwracalnych natomiast metody elektryczne i magnetyczne [13].

Wykorzystanie ultradźwięków do wykrywania defektów w materiałach i konstrukcjach stanowi jeden z ważniejszych nieniszczących sposobów badania jakości. Metody te są stosowane w wielu różnych gałęziach przemysłu, budownictwa i innych.



Rysunek 4.9. Obrazy symulacji rozpraszania fali ultradźwiękowej na modelu płytki złożonej z włókien polimerowych [132]

W defektoskopii pojęcie wady jest rozumiane w szerokim znaczeniu i obejmuje zarówno makroniejednorodności, występujące w materiale w postaci nieciągłości typu pęknięć, rozwarstwień, pęcherzy, wtrąceń, ciał obcych, jak i mikroniejednorodności, czyli mikroskopowe odchylenia od jednorodnej struktury, takie jak występowanie większych ziaren w polikryształach, defektów sieci w kryształach, a także odchyień od wymaganych własności materiału, takich jak twardość, skład (np. stopów), sprężystość (np. występowanie lokalnych naprężeń wewnętrznych) i innych. Określenie „wada” obejmuje też odchylenia od wymaganego kształtu, wymiarów geometrycznych itd.

Ultradźwiękowe metody nieniszczące nadają się do kontroli takich ośrodków jak metale i ich stopy, materiały ceramiczne, tworzywa sztuczne, beton, drewno, skały itp.

Ilościowe techniki defektoskopii, jakie rozwinęły się w ostatnich latach, są oparte na analizie amplitud sygnałów odbitych i rozproszonych od wady oraz na pomiarze czasu przelotu sygnału ultradźwiękowego przesłanego do wady i dochodzącego do odbiornika po ugięciu lub odbiciu od wady. Z rozkładem amplitud wiąże się współczynnik pochłaniania, a z czasem przelotu prędkość rozchodzenia się dźwięku. Są to wielkości charakteryzujące ośrodek, a więc współczynnik pochłaniania i prędkość dźwięku określają zasady pomiaru i możliwości zastosowania metod defektoskopii ultradźwiękowej [97].

W ośrodkach jednorodnych, w których prędkość fal jest stała, interesujące informacje uzyskuje się wprost, gdyż czas przelotu jest określony przez odległość od nadajnika do wady lub z jej poszczególnych części, natomiast w ośrodkach niejednorodnych, na przykład porowatych jak ceramika, o czasie przelotu decydują także własności ośrodka na drodze pośredniej między nadajnikiem, wadą i odbiornikiem. Ten drugi przypadek występuje między innymi przy wykorzystaniu metody czasu przelotu do badania naprężeń wewnętrznych. Ponieważ prędkość rozchodzenia się fal podłużnych jest większa (prawie dwukrotnie) niż poprzecznych, stosowanie obydwu rodzajów fal prowadzi do otrzymywania różnych czasów przelotu sygnałów ultradźwiękowych w obydwu przypadkach. Stosuje się także inne rodzaje fal, na przykład fale powierzchniowe, które także różnią się prędkością i czasem przelotu. Na podstawie wyników pomiaru czasów przelotu dla różnych konfiguracji oddziaływania fal z obiektem badanym oraz teoretycznej znajomości zmian propagacji impulsu fali przy oddziaływaniu z wadami ośrodka, można uzyskać potrzebne informacje do scharakteryzowania położenia, rozmiarów, kąta pochylenia wady czy też do określenia rozkładu innych niejednorodności, lub naprężeń wewnętrznych ośrodka.

W badaniach, oprócz fal objętościowych podłużnych i poprzecznych, stosowane są fale podpowierzchniowe, które rozchodzą się równoległe do powierzchni. Fale te są stosowane

w badaniach elementów, które nie mają równoległych ścianek, a wprowadza się je i odbiera z tej samej powierzchni. Fale podpowierzchniowe wprowadzane są na głębokość równą rzędu trzech długości fali. W przypadku, gdy badany element posiada równoległe powierzchnie w badaniach, dokonuje się pomiaru czasu między kolejnymi echem dna i pomiaru różnic amplitud. Lokalna, mniejsza zawartość włókien w kompozycie, jak i odchyłki orientacji włókien od kierunku założonego, otrzymane w procesie wytwarzania kompozytów, mają wpływ na kierunkowy rozkład prędkości fal ultradźwiękowych. Spowodowane jest to znacznie wyższym modułem sprężystości włókien od osnowy polimerowej - włókna przekazują ruch drgający cząsteczek szybciej niż osnowa polimerowa. W celu jednoznacznego określenia wad powstałych podczas wytwarzania i w czasie eksploatacji wyrobów z kompozytów należy wykonać wzorcowe próbki z kompozytu o założonej orientacji i zawartości włókien. Wady określa się przez porównania wielkości pomierzonych na obiekcie z pomiarami na próbce wzorcowej.

Metody defektoskopii ultradźwiękowej dzieli się na :

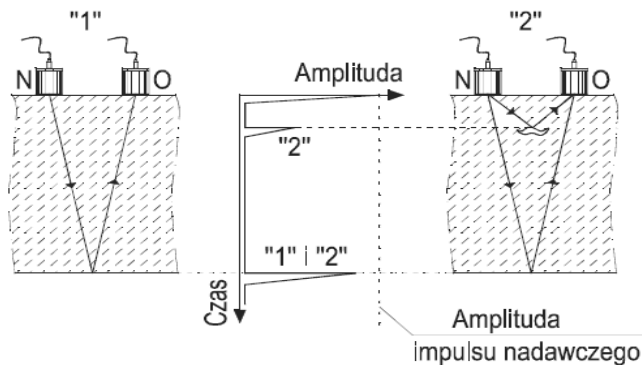
1. Metody echa (przeważające zastosowania). Metoda echa jest oparta na odbiciu fal od powierzchni obiektów i od nieciągłości obiektów.
2. Metody przepuszczania (cienia). Metoda przepuszczania jest oparta na przysłanianiu wiązki fal przez nieciągłości. Metoda ta jest przede wszystkim stosowana do badania obiektów wykonanych z materiałów silnie tłumiących fale ultradźwiękowe. Jest ona także stosowana, oprócz innych metod, do charakteryzowania nieciągłości obiektów.
3. Metody TOFD. Metoda ta jest oparta na wykorzystaniu dyfrakcyjnego ugięcia i rozpraszania fal ultradźwiękowych, m.in. na krawędziach poprzecznych, w stosunku do kierunku przebiegu fal, nieciągłości płaskich.

Metoda echa wymaga dostępu tylko do jednej powierzchni obiektu, tej, z której prowadzi się skanowanie. Ultradźwięki wykorzystywane w tych badaniach mają częstotliwość 1-2 MHz. Metodą tą można badać poliamidy, tworzywa fluorowe (policzterofluoroetylen), niektóre żywice epoksydowe, polistyren i ich kompozyty, wykrywać i lokalizować płaskie pęknięcia, mikropęknięcia (odwarstwienia), pęcherze powietrza, zanieczyszczenia. Rysunek 4.10 stanowi ilustrację zasady prowadzenia badań przy wykorzystaniu metody echa. Kiedy badania dokonuje się w obszarach elementu pozbawionego wewnętrznych defektów (pozycja „1” na rys. 4.10) wówczas na ekranie defektoskopu obserwuje się echo pochodzące od fal odbitych od dna obiektu. Gdy wewnątrz badanej konstrukcji występuje nieciągłość strukturalna, nieprzysłaniająca całkowicie wiązki fal ultradźwiękowych (pozycja „2” na rys. 4.10) wtedy na ekranie urządzenia pomiarowego zauważyć można dodatkowo echo wynikające z odbicia

się ultradźwięków od nieciągłości, a w zasadzie od powietrza, które ją wypełnia. Informacją o występowaniu wady struktury materiału badanego będzie jej echo, które pojawi się między impulsem początkowym, a echem dna elementu. Położenie echa nieciągłości wzdłuż osi czasu zawiera informację o głębokości jej położenia. Lokalizacja nieciągłości wiąże się z pomiarem czasu przejścia fali w badanym materiale.

Podstawa czasu defektoskopów ultradźwiękowych jest skalowana najczęściej w odległościach lub w rzutach odległości, a niekiedy w czasie. Zakres, w którym jest wyskalowana podstawa czasu defektoskopów ultradźwiękowych, jest nazywany zakresem obserwacji.

Lokalizacja nieciągłości polega na pomiarze czasu przejścia fali ultradźwiękowej przy znanej prędkości danego rodzaju fali ultradźwiękowej w określonym materiale.



Rysunek 4.10. Przebieg podłużnej fali ultradźwiękowej i sygnały obserwowane na ekranie defektoskopu przy wykorzystaniu metody echa [132]

Lokalizacja, tj. określanie odległości nieciągłości od powierzchni przesuwu głowicy, oraz pomiar grubości obiektów metodą ultradźwiękową są oparte na zależności:

$$l=ct/2 \quad (4.18)$$

gdzie: l - droga fal ultradźwiękowych, c - prędkość danego rodzaju fali ultradźwiękowej, w określonym materiale, w m/s lub mm/ μ s, t - czas przejścia fali ultradźwiękowej (ang. time of flight), w s lub w μ s. Liczba 2 w mianowniku wynika stąd, że droga fali, w badaniach

metodą echa, jest dwukrotnie większa od odległości reflektorów od głowic. Czas przejścia fal przez warstwę ochronną głowic i przez klin załamujący głowic skośnych jest uwzględniany w skalowaniu układu aparat-głowica [132,178].

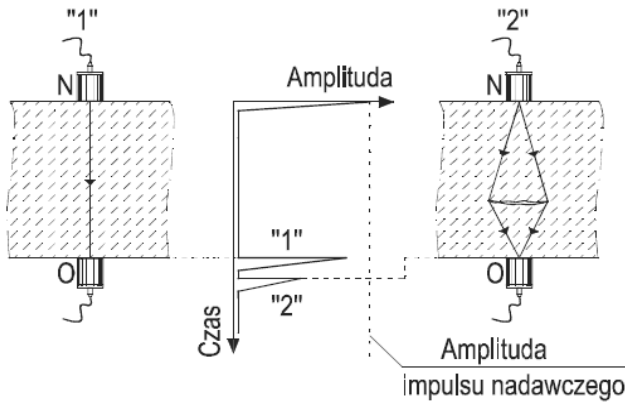
Na wysokość echa nieciągłości, przy określonym wzmocnieniu defektoskopu, mają wpływ:

- rodzaj i kształt nieciągłości,
- pole powierzchni nieciągłości,
- orientacja nieciągłości względem wprowadzonej wiązki fal ultradźwiękowych,
- odległość nieciągłości od głowicy,
- własności sprężyste, jednorodność i anizotropia materiału.

Metodą cienia akustycznego bada się cienkie elementy. Jest stosowana do badania obiektów wykonanych z materiałów silnie tłumiących fale ultradźwiękowe, wobec których nie może być zastosowana metoda echa oraz do wykrywania nieciągłości położonych blisko powierzchni obiektu. Urządzenia pracują zwykle przy częstotliwościach od 0,9 do 2,1 MHz. Metodą tą można badać paliwa raketowe i materiały wybuchowe, kompozyty oraz opony przy częstotliwościach od 100 do 500 kHz. Za pomocą fal ultradźwiękowych można kontrolować przyczepność gumy do metalu (do tego celu nadaje się, zależnie od sytuacji, zarówno metoda echa jak i metoda przepuszczania). W metodzie przepuszczania nie można lokalizować nieciągłości, gdyż obserwuje się jedynie impuls wywołany przez przejście fali, można natomiast ocenić wymiar nieciągłości. Jest ona także stosowana, oprócz innych metod, do charakteryzowania nieciągłości obiektów. Na rysunku 4.11 przedstawiono zasadę prowadzenia badań metodą przepuszczania.

W tej metodzie głowicę nadawczą i odbiorczą umieszcza się na przeciwległych powierzchniach badanego obiektu naprzeciwko siebie. Sygnał, który obserwuje się na ekranie urządzenia badawczego, stanowi impuls fali przechodzącej przez obiekt zarejestrowany przez głowicę odbiorczą. Jeżeli na drodze fali ultradźwiękowej znajduje się nieciągłość (położenie „2” na rys. 4.11), wtedy odebrany impuls ma mniejszą amplitudę i dobiega do głowicy nieco później niż wtedy, gdy fala przebiega przez materiał bez wewnętrznych defektów. O występowaniu nieciągłości badanego materiału świadczy wówczas osłabienie energii fali docierającej do odbiornika oraz dłuższy czas przejścia przez badany obiekt. Osłabienie energii zależne jest od wymiarów i położenia wady względem głowic. Większy spadek energii fali nastąpi, kiedy nieciągłość będzie znajdowała się bliżej głowicy nadawczej i co z tym związane, przysłaniać będzie większą część padającej na nią wiązki ultradźwiękowej. Szacowanie wymiarów wad struktury materiału wykrytych metodą

przepuszczania opiera się na analizie amplitudy i szerokości obwiedni odebranego impulsu [132,178].



Rysunek 4.11. Nieciągłość obiektu, przebieg fali ultradźwiękowej i sygnały obserwowane na ekranie defektoskopu przy wykorzystaniu metody przepuszczania [132].

Technika TOFD (Time-Of-Flight Diffraction) jest jedną z najdynamiczniej rozwijających się nowych technik w całym obszarze badań nieniszczących. Metoda ta jest oparta na wykorzystaniu dyfrakcyjnego ugięcia i rozpraszania fal ultradźwiękowych, m.in. na krawędziach poprzecznych, w stosunku do kierunku przebiegu fal, nieciągłości płaskich. Umożliwia wykrywalność wad płaskich (pęknięć, przyklejeń), wtrąceń, rozwarstwień. Pozwala na dokładne określenie wysokości i długości wad. Wykorzystuje się tutaj zjawisko dyfrakcji fal ultradźwiękowych na krawędziach nieciągłości płaskich oraz zjawisko odbicia. Metodą tą wykrywane mogą być dowolnie zorientowane płaskie (pęknięcia) i objętościowe (pustki) wady materiału.

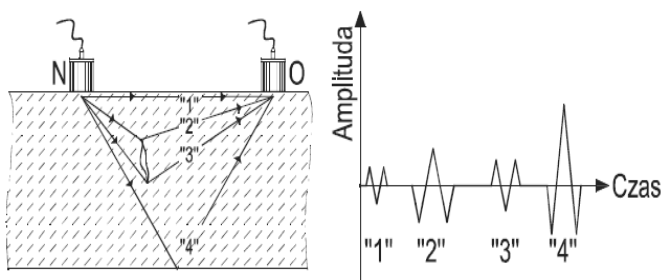
W przypadku nieciągłości zorientowanych poprzecznie, ugięcie fal następuje zarówno na ich górnych, jak i dolnych krawędziach. Pęknięcia poziome, np. rozwarstwienia, wywołują odbicie fal. Nieciągłości objętościowe powodują odbicie części wiązki fal od ich górnych powierzchni. Natomiast część wiązki obiega dolną powierzchnię pustki, tracąc swoją energię.

W metodzie TOFD głowice umieszcza się w ustawieniu równoległym po obu stronach badanego obszaru, czyli np. widocznej na powierzchni rysy. Ideę metody pokazano na rysunku 4.12. Między głowicą nadawczą i odbiorczą przebiega fala podłużna podpowierzchniowa „1”. Dyfrakcja ultradźwięków na krawędziach nieciągłości prowadzi

do powstania fal ugiętych „2” i „3”. Impulsy te docierają do głowicy odbiorczej w czasie pomiędzy rejestracją fali powierzchniowej i fali odbitej od dna elementu „4”.

Analiza wyników badań metodą TOFD polega na wykorzystaniu, oprócz informacji wynikających ze zmierzonych amplitud, informacji o fazie zarejestrowanych fal ultradźwiękowych. Impuls „4” odbity na granicy z ośrodkiem o znacznie mniejszej akustycznej oporności falowej oraz impuls fali ugiętej „2” mają fazę różną o 180° w stosunku do fali „1” i impulsu ugiętego na dolnej krawędzi wady. Analiza faz fal ugiętych może zatem dostarczać informacji o rodzaju wykrytej nieciągłości.

Na rysunku 4.12 przedstawiono badania wykorzystujące efekt dyfrakcji fal ultradźwiękowych do szacowania głębokości rys w materiale, co ważne, również z uwzględnieniem zbrojenia, które stanowią element ciągłości ośrodka mimo występujących zarysowań.



Rysunek 4.12. Sygnały obserwowane przy wykorzystaniu metody TOFD [178]

Wzmocnienia są miejscem punktowej dyfrakcji i stanowią swego rodzaju „most”, po którym fale ultradźwiękowe krótszą drogą i z większą prędkością docierają do głowicy odbiorczej. Zjawisko to uniemożliwia bezpośrednią rejestrację fal ugiętych na krawędzi zarysowań. Możliwe jest jednak odfiltrowanie tego efektu dzięki przeprowadzeniu dodatkowego pomiaru impulsu przechodzącego tylko wzdłuż zbrojenia, w strefie, gdzie nie występują zarysowania przy symetrycznym, względem rysy, układzie głowic lub wykonanie podwójnej rejestracji sygnału przy niesymetrycznym rozmieszczeniu głowic, lecz przy odwróconym kierunku transmisji fal w każdym przypadku.

W ostatnich latach, dzięki wprowadzeniu nowoczesnej techniki komputerowej, metoda TOFD uzyskała znacznie szersze możliwości zastosowań w badaniach nieniszczących [132,178].