
**XIV Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 4-7 marca 2008**

ULTRADŹWIĘKOWE BADANIA REFRAKTOMETRYCZNE

Piotr Gutkiewicz
Sławomir Mackiewicz
Jacek Szelażek
IPPT PAN Warszawa
pgutkie@ippt.gov.pl, smackiew@ippt.gov.pl, jszela@ippt.gov.pl

1. Wstęp

Jednym z zastosowań badań ultradźwiękowych jest wyznaczanie stałych sprężystości materiałów na podstawie zmierzonych prędkości propagacji fal ultradźwiękowych. Specyfika metod ultradźwiękowych polega na tym, że stałe sprężystości wyznaczone za ich pomocą odnoszą się do małych, dynamicznie zmiennych naprężeń. Doświadczenie wskazuje, że stałe te mają z reguły nieco wyższe wartości niż analogiczne stałe sprężystości wyznaczone drogą quasi statycznych testów mechanicznych.

Ważną zaletą metody ultradźwiękowej jest jej prostota. W wielu wypadkach może ona być stosowana nie tylko na próbkach wycinanych z badanego materiału ale (w sposób nieniszczący) bezpośrednio na badanym obiekcie. Może być też łatwo zastosowana w badaniach temperaturowych zmian stałych sprężystości materiałów gdzie pomiary są znacznie łatwiejsze i tańsze niż standardowe próby rozciągania prowadzone w podwyższonych temperaturach.

Sposób wyznaczania stałych sprężystości z pomiarów prędkości fal ultradźwiękowych jest uzależniony od symetrii badanego materiału. W najprostszym przypadku materiałów izotropowych konieczna jest znajomość prędkości dwóch podstawowych typów fal, tj. fal podłużnych i poprzecznych oraz gęstości masy:

Znając prędkości fali podłużnej i poprzecznej moduł Younga E oraz liczbę Poissona ν w materiale izotropowego można wyliczyć z zależności:

$$E = \rho \frac{(3V_L^2 V_T^2 - 4V_T^4)}{(V_L^2 - V_T^2)} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{(\frac{1}{2} V_L^2 - V_T^2)}{(V_L^2 - V_T^2)} \quad (2)$$

gdzie: V_L – prędkość fali podłużnej w materiale
 V_T – prędkość fali poprzecznej w materiale
 ρ – gęstość masy

Znacznie bardziej skomplikowana jest sytuacja w przypadku materiałów anizotropowych, które charakteryzują się większą liczbą niezależnych stałych sprężystości.

Jednym z najprostszych rodzajów symetrii materiałów anizotropowych jest symetria osiowa nazywana czasem poprzeczną izotropią (ang. transversal isotropy). Praktycznym przykładem takiego materiału jest np. kompozyt CFRP, w którym wszystkie włókna wzmacniające ułożone są w jednym kierunku. Materiał taki charakteryzuje się macierzą stałych sztywności sprężystej $[c_{ij}]$ o 5 niezależnych współczynnikach (c_{11} , c_{33} , c_{12} , c_{13} , c_{44}):

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Aby wyznaczyć wszystkie stałe sprężystości takiego materiału należy dokonać pomiarów prędkości 5 różnych fal ultradźwiękowych (o różnych kierunkach propagacji i polaryzacji) dobranych tak aby ich prędkości nie były od siebie wzajemnie zależne.

Wzory na prędkości fal ultradźwiękowych propagujących się w dowolnym kierunku materiału anizotropowego można uzyskać rozwiązując macierzowe równania Christoffela [8]. Dla materiału o symetrii osiowej prędkości fal w głównych kierunkach symetrii materiału wyrażają się następującymi wzorami:

$$V_{12} = \left(\frac{c_{11} - c_{12}}{2\rho} \right)^{1/2} \quad V_{13} = \left(\frac{c_{44}}{2\rho} \right)^{1/2} \quad V_{11} = \left(\frac{c_{11}}{2\rho} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$V_{33} = \left(\frac{c_{11} - c_{12}}{2\rho} \right)^{1/2} \quad V_{L45} = \left(\frac{c_{11} + c_{33} + 2c_{44} + \sqrt{(c_{11} - c_{33})^2 + 4(c_{13} + c_{44})^2}}{4\rho} \right)^{1/2}$$

gdzie pierwszy indeks przy symbolu prędkości oznacza kierunek propagacji a drugi kierunek polaryzacji fali. Kierunek 3 oznacza tutaj kierunek ułożenia włókien, zaś kierunki 1, 2 są do niego prostopadłe. Symbol V_{L45} oznacza prędkość fali quasi podłużnej rozchodzącej się pod kątem 45° względem głównej osi symetrii materiału tj. kierunku ułożenia włókien. Mierząc wyszczególnione powyżej prędkości fal ultradźwiękowych wyznaczyć można wszystkie stałe sprężystości rozpatrywanego materiału.

Jeszcze bardziej skomplikowane jest odtworzenie macierzy stałych sprężystości dla materiałów o niższej symetrii. Przykładowo materiał o symetrii ortotropowej (np. zimnowalcowana blacha, kompozyt CFRP zbrojony w różnych kierunkach) posiada 9 niezależnych stałych sprężystości i w związku z tym wymaga pomiaru aż 9 różnych prędkości fal ultradźwiękowych.

Zazwyczaj prędkości propagacji fal wyznaczane są poprzez pomiar czasu przejścia fali przez próbkę o znanej grubości. Wyznaczona w ten sposób prędkość jest uśredniona na drodze fali, czyli na grubości próbki. Wykorzystując fale podpowierzchniowe możliwy jest pomiar czasu przejścia fali w powierzchniowej warstwie materiału ale do wykonania takiego pomiaru konieczna jest odpowiednio duża próbka, pozwalająca na pomiar czasu przejścia na drodze o długości wielu centymetrów, oraz zestaw specjalnych głowic ultradźwiękowych.

Jednym ze sposobów precyzyjnych pomiarów prędkości propagacji fal ultradźwiękowych jest refraktometria ultradźwiękowa. W tej metodzie do oceny prędkości wykorzystywany jest nie czas przejścia fal na określonej drodze a kątowa zależność współczynnika odbicia fali podłużnej na granicy ciecz – powierzchnia próbki. Technika ta pozwala na wyznaczanie prędkości propagacji fal w powierzchniowej warstwie materiału. Pomiaru takie są szczególnie istotne w przypadku badania materiałów o zmiennych własnościach sprężystych w funkcji głębokości, czyli na przykład w badaniach materiałów gradientowych, które w ostatnich latach znajdują coraz liczniejsze zastosowania w przemyśle. W porównaniu do klasycznych technik pomiaru prędkości, refraktometryczne pomiary pozwalają na:

- pomiary prędkości w wierzchniej warstwie materiału,
- pomiary falami wnikającymi na różne głębokości i tym samym badania rozkładów prędkości fal na głębokości,
- pomiary quasi-punktowe i mapowanie rozkładów prędkości na powierzchni próbki,
- pomiary kierunkowych rozkładów prędkości (ocena anizotropii).

Istotną zaletą pomiarów refraktometrycznych jest także to, że do obliczenia prędkości fal nie jest potrzebna dokładna znajomość grubości próbki.

Celem referatu jest przedstawienie obecnych zastosowań refraktometrii oraz pokazanie kierunków rozwoju tej techniki pomiarowej.

2. Zasada pomiaru prędkości propagacji fal w refraktometrze ultradźwiękowym

W refraktometrze badana próbka zanurzona jest w cieczy o znanej prędkości propagacji fali podłużnej. Zasada działania refraktometru polega na pomiarze zależności współczynnika odbicia fali ultradźwiękowej od powierzchni próbki w funkcji kąta padania fali na tę powierzchnię. Fala podłużna rozchodząca się w cieczy, po dotarciu do powierzchni próbki częściowo się od niej odbija, częściowo zaś przenika przez granicę ośrodków i w zależności od kąta padania, generuje w materiale próbki jedną lub dwie fale załamane lub też jedynie falę powierzchniową. Kąty załamania tych fal wyliczać można z prawa Snelliusa:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_z} = \frac{c}{c_z} \quad (5)$$

gdzie:

- α, α_z – odpowiednio kąty fali padającej i załamanej,
- c, c_z – odpowiednio prędkości fali padającej i załamanej.

W refraktometrii interesujące są głównie krytyczne kąty padania, czyli takie, przy których kąty załamania wynoszą 90° . Pierwszy i drugi kąt krytyczny to kąty padania, przy których kąty załamania, odpowiednio fali podłużnej i poprzecznej, wynoszą 90° . Trzeci kąt krytyczny odpowiada powstaniu w próbce fali powierzchniowej. Dla kątów padania większych od trzeciego kąta krytycznego w materiale próbki nie rozchodzą się żadne fale i padająca na granicę ciecz-próbka wiązka fal ulega całkowitemu odbiciu.

Ciśnieniowy współczynnik odbicia fali płaskiej na granicy ciecz-ciało stałe opisany jest teoretyczną zależnością:

$$R = \frac{1}{N} \left[\left(\frac{c_t}{c_l} \right)^2 \sin 2\alpha_l \sin 2\alpha_t + \cos^2 2\alpha_t - \frac{\rho c}{\rho_c c_c} \frac{\cos \alpha_l}{\cos \alpha} \right] \quad (6)$$

$$\text{gdzie: } N = \left(\frac{c_t}{c_l} \right)^2 \sin 2\alpha_l \sin 2\alpha_t + \cos^2 2\alpha_t - \frac{\rho c}{\rho_c c_c} \frac{\cos \alpha_l}{\cos \alpha}$$

c, c_l, c_t – prędkości fal w cieczy, fali podłużnej i poprzecznej w ciele stałym,
 $\alpha, \alpha_l, \alpha_t$ – kąty padania fali w cieczy, załamania fali podłużnej i poprzecznej
w ciele stałym

Fakt, że przy zwiększaniu kąta padania najpierw fala podłużna a potem poprzeczna przestają być generowane w materiale próbki ma odzwierciedlenie w wartości współczynnika odbicia fali od powierzchni próbki. Mierząc amplitudę fali odbitej i znajdując kąty padania odpowiadające kątom krytycznym można wyznaczyć prędkości fal w materiale próbki ze wzoru:

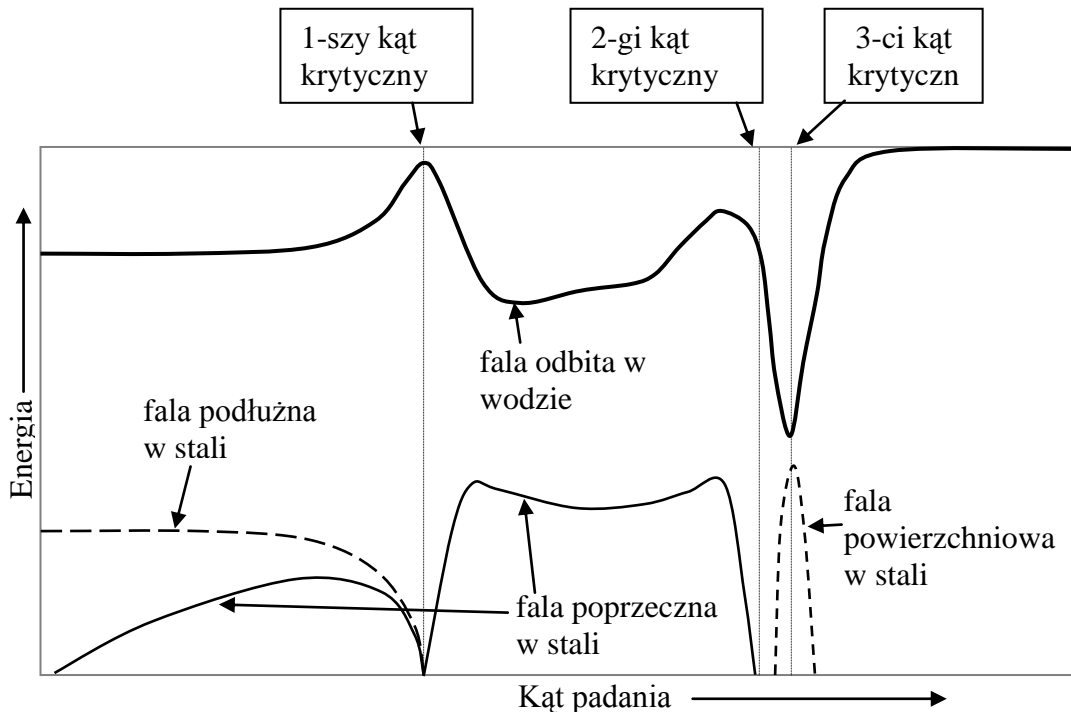
$$c_f = c * \sin(\alpha_{kryt}) \quad (7)$$

gdzie:

c, c_f – odpowiednio prędkości fal w cieczy i materiale próbki,
 α_{kryt} – krytyczny kąt padania.

Ze wzoru widać, że dokładność wyznaczania prędkości c_f będzie tym większa im dokładniej znana będzie prędkość fali podłużnej w cieczy c oraz im dokładniej mierzony będzie kąt padania fali.

Kątowe zmiany energii fali odbitej od powierzchni woda-stal i fal powstających w stali można schematycznie przedstawić jak na rysunku 1.



Rys. 1. Schematyczna zależność energii fali odbitej na granicy woda-stal i fal powstających w stali (podłużnej, poprzecznej i powierzchniowej) [1].

Są to zależności dla fali płaskiej padającej na płaską granicę ciecz-ciało stałe. Widoczne są wyraźne zmiany energii fali odbitej przy 1-szym kącie krytycznym (maksimum) i przy 3-cim kącie krytycznym (minimum). Natomiast przy drugim kącie krytycznym zmiana amplitudy fali odbitej jest nieznaczna i pomiar wartości tego kąta na podstawieątowej zależności współczynnika odbicia jest utrudniony. Trudności w ocenie drugiego kąta krytycznego są źródłem prac teoretycznych, których celem było lepsze poznanie zjawisk zachodzących podczas odbicia fali i dzięki temu dokładniejsze wyznaczenie prędkości propagacji fali poprzecznej w materiale próbki.

Ze wzoru (3) wynika, że do dokładnego wyznaczenia prędkości fali w próbce konieczna jest znajomość prędkości fali podłużnej w cieczy. Ponieważ prędkości fal w cieczach silnie zależą od temperatury, w badaniach refraktometrycznych stosuje się specjalną mieszaninę wody i alkoholu etylowego, w której prędkość fali podłużnej jest praktycznie niezależna od temperatury [2]. Dzięki różnym współczynnikom temperaturowych zmian prędkości fal dla wody ($b = +2,5 \text{ [m s}^{-1} \text{ K}^{-1}]$) i alkoholu ($b = -3,6 \text{ [m s}^{-1} \text{ K}^{-1}]$) efekt ten osiąga się w mieszaninie zawierającej 17% alkoholu w wodzie. Zastosowanie tego typu cieczy pozwala na prowadzenie pomiarów refraktometrycznych w temperaturach pokojowych bez konieczności termostatowania aparatury. Innym rozwiązaniem jest prowadzenie badań w czystej wodzie (dla której temperaturowa zależność prędkości jest dokładnie znana) z jednoczesnym pomiarem temperatury wody i obliczaniem odpowiednich poprawek. Przykładowo, przy badaniu prędkości fali powierzchniowej w stali, w wodzie o temperaturze „pokojowej”, zmiana temperatury wody o 2 C° jest równoznaczna ze zmianą wyniku pomiaru prędkości o około 10 m/s, czyli o 0,3%. Dlatego też w niektórych współczesnych układach pomiarowych temperatura cieczy jest stabilizowana z dokładnością do $0,1 \text{ C}^\circ$ [3].

Jak wynika z rysunku 1 najbardziej wyeksponowana jest zmiana amplitudy fali odbitej obserwowana przy trzecim kącie krytycznym, zwanym kątem Rayleigha. Zazwyczaj jest to ostre minimum amplitudy, któremu towarzyszy zmiana rozkładu ciśnienia akustycznego w przekroju wiązki fali odbitej i zmiana fazy fali odbitej. Wiązka fal odbitych od granicy ciecz – ciało stałe wygląda jakby uległa przesunięciu względem wiązki fal padających lub jakby odbicie następowało nie na, ale pod powierzchnią ciała stałego. Zjawisko przesunięcia wiązki odbitej nazwano zjawiskiem Schocha, który w roku 1950, w pracy [4], przedstawił wzór na wielkość przesunięcia wiązki fali Δ w zależności od prędkości fali w cieczy i ciele stałym, długości fali oraz gęstości obu ośrodków:

$$\Delta = \lambda^L \frac{2\rho}{\pi\rho^L} \left(\frac{c_S/c^L - c_S/c^L - c_S/c_R}{c_S/c_R - c_S/c_R - 1} \right)^{1/2} * \frac{1 + 6 \frac{c_S}{c_R} - 1 - \frac{c_S}{c_D} - 2 \frac{c_S}{c_R} - 3 - 2 \frac{c_S}{c_D}}{c_S/c_R - c_S/c_D} \quad (8)$$

gdzie: c_S , c_R i c_D to odpowiednio prędkości fal poprzecznej, podłużnej i powierzchniowej w ciele stałym,

c^L to prędkość fali podłużnej w cieczy,

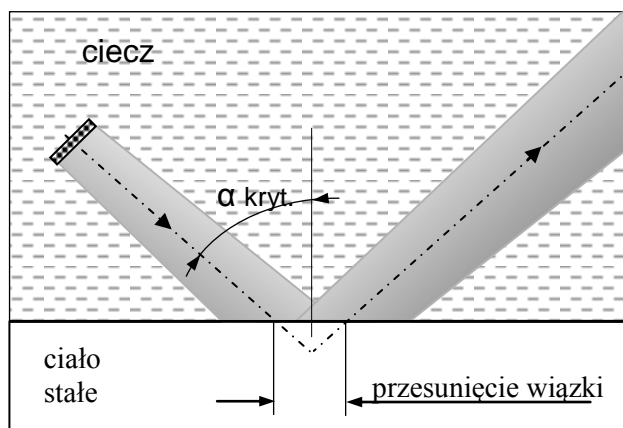
ρ to gęstość ciała stałego,

ρ^L i λ^L to odpowiednio gęstość i długość fali podłużnej w cieczy.

Przesunięcie wiązki odbitej względem wiązki padającej przy trzecim kącie krytycznym pokazano schematycznie na rysunku 2.

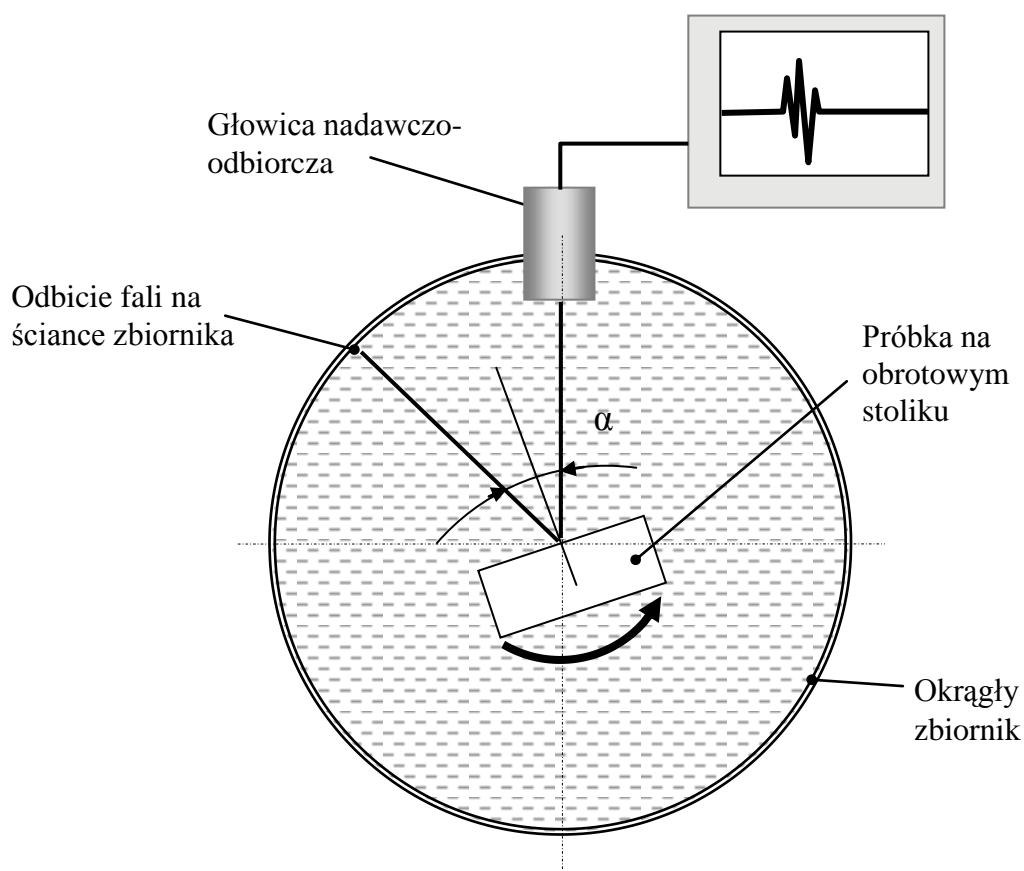
Dzięki przesunięciu wiązki i wywołanemu nim spadkowi amplitudy fali odbitej od granicy ciecz-ciało stałe, pomiar trzeciego kąta krytycznego jest najłatwiejszy i kąt ten może być wyznaczany z wysoką dokładnością [5].

Rys. 2.
Schematyczny obraz wiązki padającej i odbitej przy 3-cim kącie krytycznym z uwidocznionym przesunięciem wiązki odbitej



3. Refraktometr odbiciowy

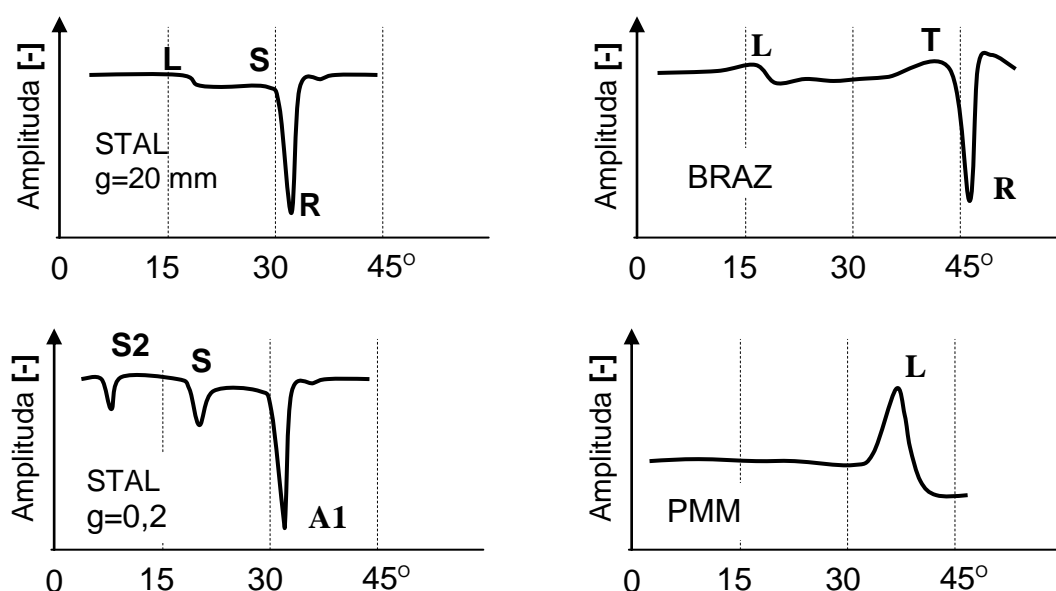
Obserwacje kątowej zależności współczynnika odbicia fal na granicy ciecz-ciało stałe można realizować przy różnych konfiguracjach pomiarowych. Od tego jaka konfiguracja zostanie przyjęta zależna jest budowa urządzenia – refraktometru. Schemat działania urządzenia wyposażonego w jedną głowicę nadawczo-odbiorczą i walcowy zbiornik pokazany jest na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat działania refraktometru jednogłowicowego, pracującego metodą echa i wyposażonego w kołowy zbiornik.

Próbka umieszczona jest na obrotowym stoliku dokładnie w osi okrągłego zbiornika napełnionego cieczą pomiarową. Fala podłużna generowana przez głowicę ustawioną wzdłuż średnicy zbiornika pada na powierzchnię próbki, odbija się od niej i dociera do ścianki zbiornika. Pada na nią pod kątem prostym i po odbiciu wraca do próbki, gdzie ponownie ulega odbiciu w kierunku głowicy. Wynikiem pomiaru jest kątowa zależność amplitudy odbieranej fali.

Układ „jednogłowicowy” wymaga precyzyjnego wykonania walcowego zbiornika i dokładnie osiowego umieszczenia w nim stolika, na którym mocowana jest próbka. Refraktometr działający według tej zasady oraz wyniki badań różnych materiałów opisano w pracy [6]. Przykładowe wyniki uzyskane podczas badania próbek ze stali, brązu i tworzywa sztucznego pokazano na rysunku 4. Pokazują one kątową zależność amplitudy odbieranego impulsu, na których widoczne są wyraźne minima amplitudy przy 3-cim kącie krytycznym (dla tworzywa sztucznego o prędkości fal powierzchniowych niższej od prędkości fal w wodzie widoczne jest w tym miejscu maksimum amplitudy) i nieznaczne jedynie zmiany amplitudy dla 1-go kąta krytycznego. Powoduje to, że precyzyjne wyznaczenie prędkości fal podłużnych i poprzecznych w urządzeniu pokazanym na rysunku 3 jest trudne o ile w ogóle możliwe.

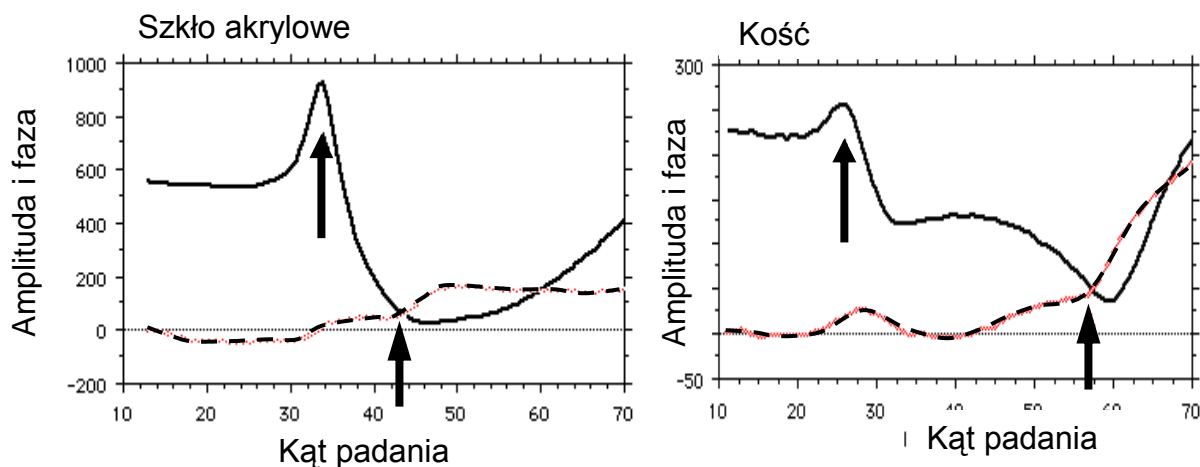


Rys. 4. Przykładowe zależności amplitudy fali dwukrotnie odbitej od próbki od kąta padania. Litery L, S, R oznaczają odpowiednio kąty krytyczne dla fal podłużnej, poprzecznej i powierzchniowej a S1, S2 i A1 – dla symetrycznych i asymetrycznych modów fal płytowych. (Z pracy [2]).

Wyraźne minima, pozwalające na wyznaczenie prędkości fal, widoczne są dla stalowej próbki o grubości 0,2 mm. Pochodzą one od powstających w próbce fal płytowych, których prędkości fazowe mogą być metodą refraktometryczną dokładnie wyznaczone.

Nowym polem zastosowań refraktometrii ultradźwiękowej są badania medyczne – głównie właściwości mechanicznych kości, zmieniające się na przykład w wyniku osteoporozy czy po długim pobycie w stanie nieważkości. W pracy [7] przedstawiono wyniki refraktometrycznego badania próbek, dla których mierzono nie tylko amplitudę fali odbitej od powierzchni próbki ale i fazę tej fali. Na rysunku 5 pokazującym wyniki tych badań, amplituda fali narysowana jest linią ciągłą a zmiana fazy linią przerywaną. Wykres pokazuje

wyniki uzyskane na próbce ze szkła akrylowego i na próbce kości. Strzałki na wykresach wskazują kąty krytyczne dla fali podłużnej, związane z wyraźnym maksimum amplitudy, i dla fali poprzecznej w miejscach gwałtownej zmiany przebiegu fazy impulsu.



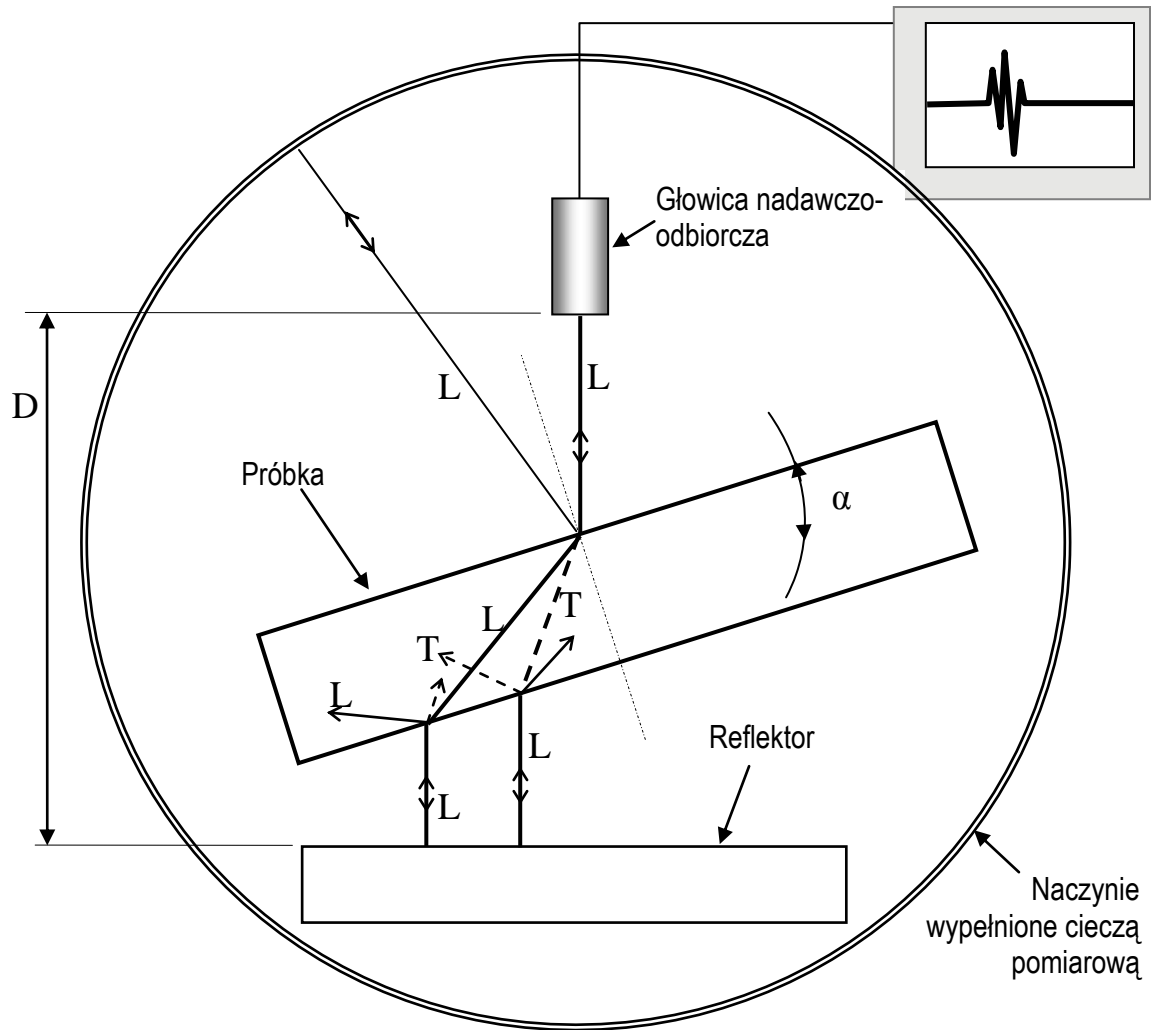
Rys. 5. Zależności amplitudy (linia gruba) i fazy (linia przerywana) fali odbitej od a) szkła akrylowego, b) kości. Strzałki pokazują kąty krytyczne. (Z pracy [7]).

Dla kości i szkła akrylowego, podobnie jak dla PMM pokazanego na rysunku 5, widoczne są wyraźne maksima amplitudy fali odbitej obserwowane dla pierwszego kąta krytycznego. Natomiast zmiana amplitudy przy drugim kącie krytycznym jest praktycznie niezauważalna. Kąt ten jest natomiast widoczny jako nagła zmiana fazy impulsu.

Przeprowadzone w IPPT próby wykorzystania zmian fazy impulsu odbitego do wyznaczania prędkości fal podłużnej i poprzecznej w próbkach stalowych, czyli materiale o znacznie większej oporności falowej niż kość czy tworzywo sztuczne, nie przyniosły zadowalających rezultatów. Zarówno dla 1-go jak i 2-go kąta krytycznego zmiany fazy nie zaobserwowano. Oznacza to, że w klasycznym, odbiciowym, refraktometrze ultradźwiękowym jedyną falą, której prędkość można dokładnie wyznaczyć jest fala powierzchniowa.

5. Refraktometr transmisyjny

W pracy [8] opisano nowy sposób pomiaru prędkości fal w próbkach zanurzonych w cieczy o znanej prędkości. Sposób pomiaru opracowano do wyznaczania własności sprężystych anizotropowych materiałów kompozytowych. Zasadę pomiaru przedstawia rysunek 6. Płaskorównoległa próbka ustawiona jest na obrotowym stoliku i zanurzona w cieczy o znanej prędkości fali podłużnej. Głowica na fale podłużne nadaje impuls fal, który po dojściu do powierzchni próbki częściowo odbija się od niej, częściowo wnika do próbki. W zależności od kąta padania α w materiale próbki powstaje fala podłużna, poprzeczna lub powierzchniowa. Fale podłużna i poprzeczna docierają do drugiej powierzchni próbki i przenikają do cieczy rozchodząc się dalej jako fale podłużne, w tym samym kierunku jak przed wejściem do próbki. Fale to docierają do płaskiego, rozległego reflektora ustawionego prostopadłe do kierunku padania i odbijają się od niego. Powracają do próbki, ponownie ulegają na jej powierzchni załamaniu lub transformacji, dochodzą do drugiej powierzchni próbki, ponownie wnikają do cieczy i docierają do głowicy. Rejestrowane są czasy przejścia fal dla różnych kątów padania α .



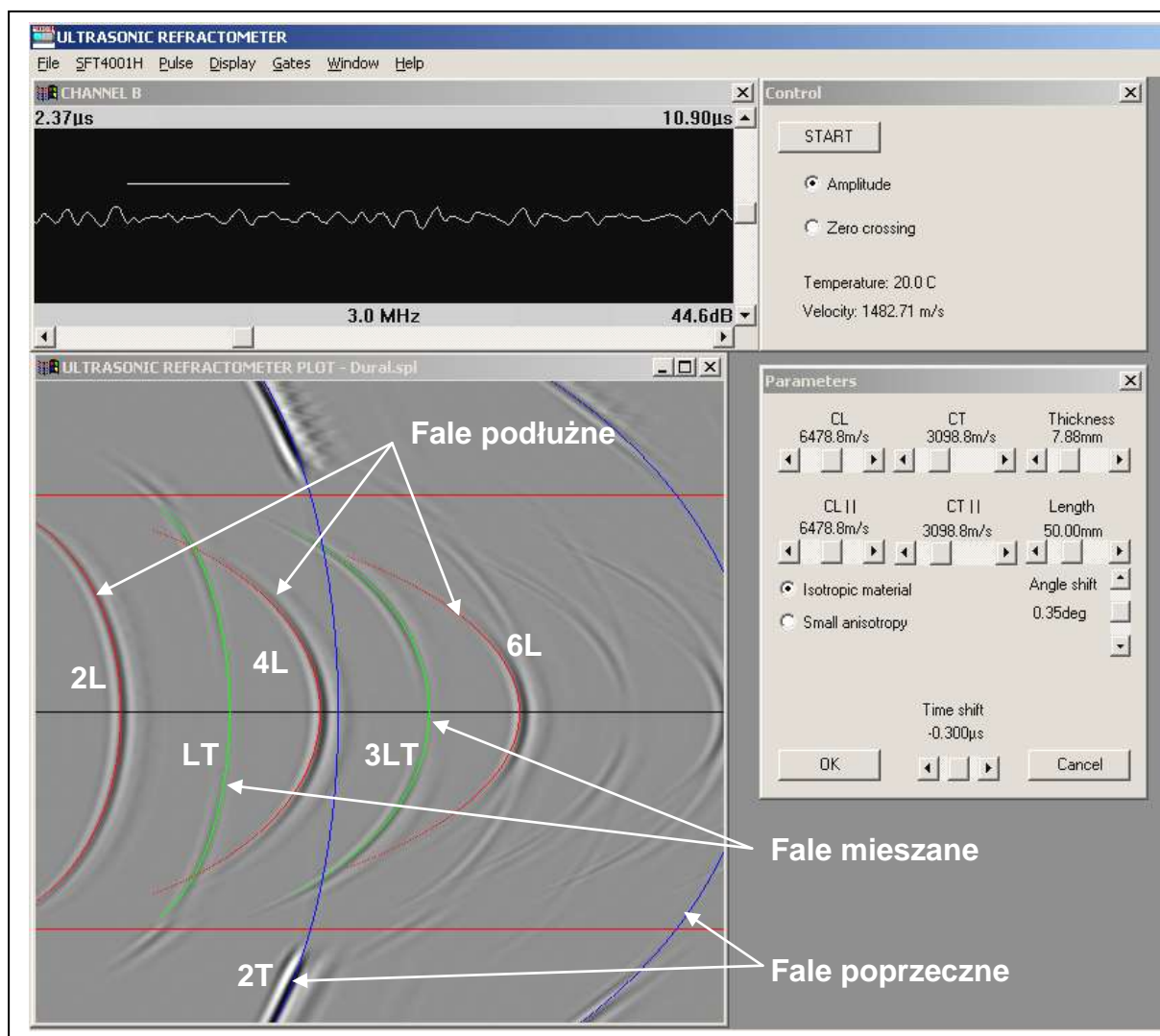
Rys. 6. Schemat pomiaru czasów przejścia fal w refraktometrze transmisyjnym.

Fale rozchodzące się zgodnie z powyższym opisem narysowane są grubą linią. W rzeczywistości poza falami, których czasy przejścia są mierzone, w próbce rozchodzą się również inne fale będące wynikiem odbić fal wewnątrz próbki oraz transformacji fal w drodze powrotnej, po odbiciu się od reflektora. Te dodatkowe drogi fal narysowano liniami cienkimi. Niektóre z nich są również rejestrowane przez głowicę odbiorczą co komplikuje analizę wyników choć teoretycznie każda z tych fal niesie informacje o prędkości fali w materiale próbki.

Z zależności geometrycznych, dla każdego kąta α można obliczyć drogi fal w próbce i w wodzie. Znając czasy przejścia fal od momentu nadania do odbioru, prędkość fal w cieczy oraz odległość D między głowicą a reflektorem można wyznaczyć prędkości fal podłużnej i poprzecznej w próbce a w przypadku materiałów anizotropowych wyznaczyć kątowe rozkłady prędkości tych fal. Refraktometr transmisyjny jest więc narzędziem umożliwiającym wyznaczanie prędkości fal podłużnych i poprzecznych w próbkach płaskorównoległych wykonanych z dowolnych, nie tylko izotropowych, materiałów. W pracy [8] opisane są wyniki obliczeń pozwalających na wyznaczenie stałych sprężystości próbek anizotropowych na podstawie kątowych rozkładów czasów przejścia fal przez próbki kompozytów. Autorzy w swoich rozważaniach uwzględnili dowolną orientację anizotropii próbki względem płaszczyzny badania. W refraktometrze opisanym w tej pracy jedna nadawczo-odbiorcza

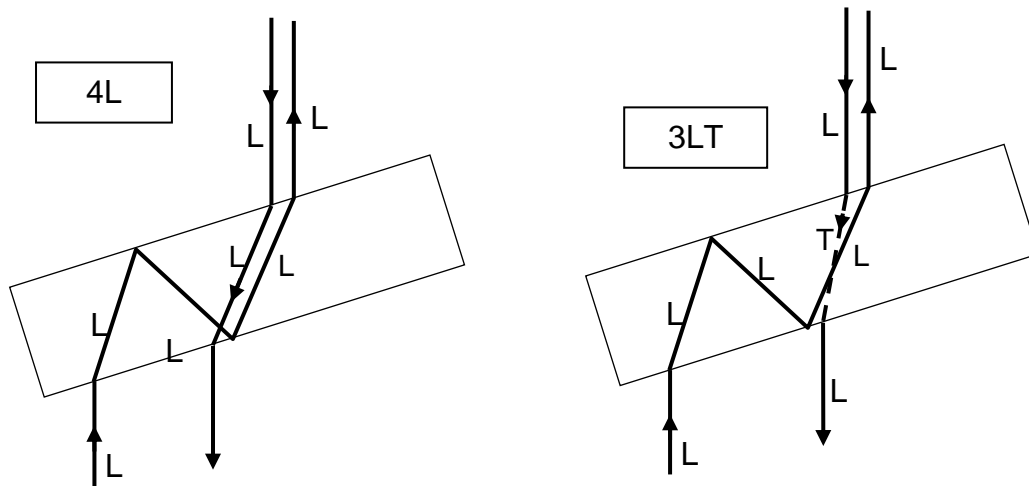
pozwała na wykonanie kątowych zależności zarówno czasów przejścia fal przez próbkę jak i zależności współczynnika odbicia fal od powierzchni próbki (podobnie jak w jednogłównicowym refraktometrze odbiciowym). Zbiornik opisanego w pracy aparatu jest wypełniony czystą wodą a w celu utrzymania stałej prędkości fal w wodzie jej temperatura jest równa 29,8°C i stabilizowana z dokładnością $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Kąt obrotu próbki jest mierzony z dokładnością $0,01^\circ$.

W Pracowni Ultradźwiękowych Badań Materiałów IPPT PAN wykonany został na bazie refraktometru jednogłównicowego prototyp refraktometru transmisyjnego. Do generacji, odbioru i pomiarów czasu przejścia fal wykorzystano komputerową, dwukanałową kartę ultradźwiękową typu SFT4001HPCI o częstotliwości próbkowania sygnału 60 MHz. Do wizualizacji wyników pomiarów opracowany został program obrazujący przebiegi czasowe impulsów w sposób podobny jak ma to miejsce w metodzie TOFD (wartości amplitudy fali na osi czasu zobrazowane są odcieniami szarości, od bieli do czerni). Impulsy fal są generowane, odbierane i zapisywane jeden pod drugim w przedziale czasowym 8.53 μs po każdym obrocie stolika z próbką o 5 minut kątowych. Tworzy się pokazany na rysunku 7 obraz, na którym oś pionowa odzwierciedla zmianę kąta padania fali na próbkę (kąt α) a oś pozioma czas wędrówki fali.



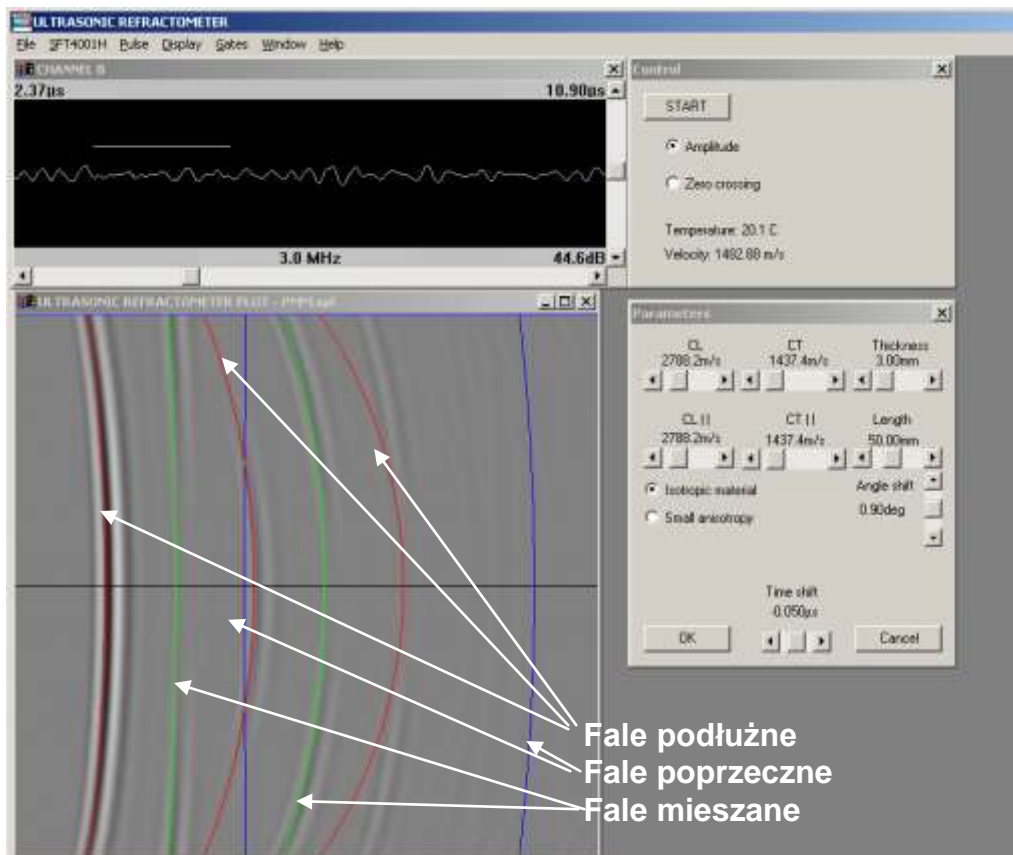
Rys. 7. Wyniki badania próbki duralowej o grubości 7.88 mm.

Na rysunku opisano symbolicznie odbierane impulsy. Na przykład **2L** oznacza, że fala dwukrotnie przebyła grubość próbki jako fal podłużna. Symbol **LT** oznacza, że przez próbkę fala raz przechodziła jako podłużna a drugi raz jako poprzeczna. Droga fal w próbce dla oznaczeń **4L** i **3LT** pokazana jest na rysunku 8.



Rys. 8. Drogi fal w próbce duralowej o grubości 7.88 mm i ich symboliczne oznaczenia.

Na rysunku 9 pokazano obraz uzyskany przy badaniu próbki w polimetakrylanu metylu (PMM) o grubości 3,0 mm. Widoczny jest inny układ zależności kąt-czasu przejścia fal



Rys. 9. Wyniki badania próbki z PMM o grubości 3.0 mm

wynikający głównie z niższej prędkości propagacji fal w PMM niż w stopie lekkim.

Widoczna jest też niska amplituda fal poprzecznych ulegających silnemu osłabieniu w PMM. Na ekranie komputera zobrazowane są więc tory impulsów przechodzących, wielokrotnie odbitych i transformacyjnych w próbce w zakresie ± 21 stopni kątowych obrotu stolika. Na tym obrazie program komputerowy tworzy siatkę teoretycznych torów impulsów w próbce o zadanej grubości oraz zadanych prędkościach fal podłużnych i poprzecznych w kierunku prostopadłym do powierzchni próbki. Prędkości fal można regulować ze skokiem 0.2 m/s a grubość próbki wybrać z dokładnością do 0.01 mm za pomocą suwaków. Równoczesny pomiar prędkości obu rodzajów fal polega na dopasowaniu za pomocą suwaków i nałożeniu teoretycznej siatki torów na obraz ultradźwiękowy uzyskany ze skanowania w refraktometrze próbki o znanej grubości. Pomagają w tym dodatkowe suwaki pozwalające na przesuw całej siatki w pionie ze skokiem 5 minut kątowych (kąt α) i w poziomie ze skokiem 16.67 ns (opóźnienie). Dla pomiaru obu prędkości w ośrodku izotropowym wystarczy znajomość położenia torów dwóch impulsów fali podłużnej i jednego transformacyjnego impulsu fali poprzecznej, jednak w programie zobrazowane są trzy tory impulsów fali czysto podłużnej, dwa impulsy fali czysto poprzecznej w próbce oraz dwa impulsy kombinacji fal podłużnej i poprzecznej. Dla lepszego rozróżnienia, impulsy wielokrotne fali podłużnej zaznaczone są kolorem czerwonym, impulsy wielokrotnie odbitej fali poprzecznej kolorem niebieskim a impulsy kombinacji fal kolorem zielonym. Dodatkowo czarna pozioma linia pokazuje normalny kąt padania, czerwone linie poziome pierwszy kąt krytyczny a niebieskie linie poziome drugi kąt krytyczny. Zakresy rysowanych torów impulsów są ograniczone do rzeczywistej długości próbki, którą można ustawić suwakiem z dokładnością do 0.01 mm. Obecnie parametr ten jest ustalony na 50 mm przez rozmiar uchwytu próbki. Tory rzeczywistych odebranych impulsów zawierających na swej drodze falę poprzeczną charakteryzuje dodatkowo zanik amplitudy przy kątach padania α zbliżonych do normalnego. Jako ciecz pomiarową w refraktometrze zastosowano wodę destylowaną, której temperatura jest mierzona i służy do korekcji prędkości fali ultradźwiękowej. Wyniki pomiaru w postaci obrazu torów ech z nałożoną siatką i odpowiadającymi jej wartościami prędkości można zapisać w zbiorze dyskowym a następnie odtworzyć do ponownej analizy. Zmierzone w refraktometrze głowicą o częstotliwości 3 MHz prędkości wybranych próbek nie różnią się więcej niż ± 5 m/s od prędkości zmierzonych głowicą normalną na fale podłużne o częstotliwości 2 MHz i głowicą normalną na fale poprzeczne o częstotliwości 4 MHz. Dokładność pomiarów zależy od dokładności pomiaru grubości próbki, wynikającej z częstotliwości próbkowania rozdzielczości pomiaru czasu przejścia (± 16.67 ns), dokładności określenia prędkości w cieczy pomiarowej oraz od stosunku sygnału do szumu. W przypadku materiałów wykazujących niewielką anizotropię możliwa jest dodatkowo regulacja prędkości fali podłużnej i poprzecznej w kierunku równoległym do powierzchni próbki. W przyszłości planowane jest uwzględnienie różnych rodzajów anizotropii w postaci wybieranych opcji programu a także pomiary przy obrocie próbki wokół punktu wprowadzenia fali dla uzyskania pełnej informacji o własnościach sprężystych materiału we wszystkich kierunkach.

6. Wnioski

Dane literaturowe oraz własne doświadczenia dotyczące refraktometrii ultradźwiękowej świadczą o tym, że refraktometria odbiciowa znajduje zastosowania w badaniach materiałów takich jak tworzywa sztuczne, kości czy tkanki biologiczne. Są to ośrodki, w których możliwe jest, przy wykorzystaniu kątowych zależności zmian amplitudy i fazy, wyznaczenie prędkości wszystkich typów fal ultradźwiękowych. Natomiast w badaniach kompozytów, z założenia silnie anizotropowych, w których rozchodzić się mogą fale podłużne i dwa rodzaje fal poprzecznych (szybka i wolna) większe zastosowanie znajduje

może znaleźć refraktometr transmisyjny pozwalający na wyznaczenie pełnej macierzy stałych sprężystości tych materiałów. Jest to więc narzędzie teoretycznie pozwalające na odtworzenie stałych sprężystości w ośrodkach o dowolnej anizotropii. Ograniczeniem jest jedynie to, że próbka musi być płaskorównoległa. W zależności od osłabienia fal w materiale próbki jej grubość musi być na tyle ograniczona, że impulsy przechodzące wielokrotnie przez próbkę i odbijające się od jej powierzchni muszą być rejestrowalne.

7. Literatura

- [1]. A. Śliwiński „Ultradźwięki i ich zastosowania”, WNT Warszawa, 2001.
- [2]. J. Obraz, Ultradźwięki w technice pomiarowej, WNT, Warszawa 1983.
- [3]. T. Imamura, Measuring method for the mechanical anisotropy of solids by water immersion ultrasonic sing-around method, Proc. WCU 2003, Paris, September 7-10, 2003, pp. 769-772
- [4]. A. Schoch, Schallreflexion, Schallbrechung und Schallbeugung, Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, Vol. 23, 1950, p. 234.
- [5]. J. Szelażek, Refraktometria ultradźwiękowa, Mat. 34 Krajowej Konferencji badań Nieniszczących, Zakopane 24-27 października 2005, wyd. EKOPOL JRL Chorzów, str. 85-94.
- [6]. A. Brokowski, J. Deputat, An ultrasonic refractometer, Polish Technical Review, Nr. 6, 1981, str. 15-18.
- [7]. P. Antich, S. Mehta, Ultrasound critical-angle reflectometry (UCR); a new mode of functional elastometric imaging, Physics in Medicine and Biology, www.swmed.edu/home_pages/ucrlab/UCRTheorypaper.htm
- [8]. S.I. Rokhlin, W.Wang, Double through-transmission bulk wave method for ultrasonic phase velocity measurement and determination of elastic constants of composite material, J.Acoust.Soc.Am. 91 (6), June 1992