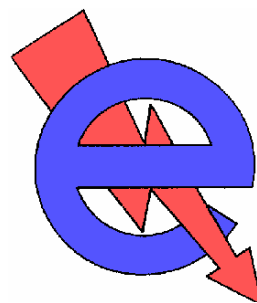




INSTYTUT ELEKTRONIKI  
I SYSTEMÓW STEROWANIA



WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY  
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

*LABORATORIUM FIZYKI*

***ĆWICZENIE NR A-2***

***WYZNACZANIE PRĘDKOŚCI DŹWIĘKU  
W WYBRANYCH MATERIAŁACH  
PRZY UŻYCIU  
KARTY CYFROWEJ DEFECTOSKOPU  
ULTRADŹWIĘKOWEGO***

## I. Zagadnienia do przestudiowania

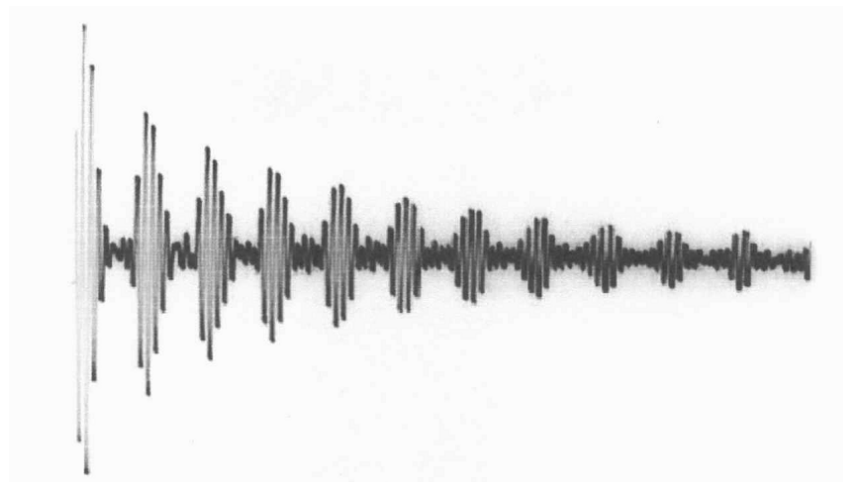
1. Rozchodzenie się fal sprężystych w różnych ośrodkach
2. Fale dźwiękowe (ultradźwięki), rodzaje fal ultradźwiękowych
3. Wyznaczanie prędkości dźwięku w materiałach

## II. Cel ćwiczenia

Wyznaczenie prędkości fal ultradźwiękowych w różnych materiałach przy użyciu karty cyfrowego defektoskopu ultradźwiękowego.

## III. Zasada pomiaru

Dokonywany jest pomiar grubości próbki materiału przy użyciu suwmiarki. Próbkę po zwilżeniu jej ścianek wodą lub olejem umieszcza się pomiędzy dwoma głowicami ultradźwiękowymi  $G_1$  i  $G_2$  zamontowanymi na szynie. W trakcie pomiaru obie głowice należy mocno docisnąć do powierzchni badanej próbki. Na jedną z głowic ultradźwiękowych jest podawany impuls z generatora karty ultradźwiękowej, a druga głowica stanowi głowicę odbiorczą. Impulsy podawane są do komputera z zamontowaną kartą ultradźwiękową *Opcard*. Na ekranie programu otrzymuje się ciąg kolejnych ech impulsów ultradźwiękowych, których amplitudy maleją eksponentalnie (patrz rys. 1). Pierwszy sygnał odpowiada sytuacji, kiedy impuls z generatora karty przeszedł przez całą grubość próbki i został zarejestrowany przez głowicę odbiorczą. Drugi i wszystkie kolejne sygnały stanowią tzw. echo. Są to impulsy, które po przejściu przez próbkę zostały odbite od zewnętrznej powierzchni próbki w pobliżu głowicy odbiorczej, przeszły powtórnie całą próbkę i ponownie zostały odbite od zewnętrznej powierzchni styczącej do głowicy nadawczej po czym dotarły do głowicy odbiorczej. Pierwsze echo daje impuls, który przebiegł dodatkowo dwa razy długość próbki, w porównaniu z pierwszym obserwowanym na ekranie programu. Drugie echo odpowiada dodatkowemu czterokrotnemu przejściu generowanego impulsu przez próbkę.



Rys. 1. Obraz ciągu sygnałów echa ultradźwiękowego obserwowany na ekranie programu

## Ćwiczenie A-2: Wyznaczanie prędkości dźwięku w wybranych materiałach przy użyciu karty cyfrowej defektoskopu ultradźwiękowego

Droga przebyta przez impuls ultradźwiękowy w badanym materiale jest równa  $S=2nL$ , gdzie  $L$  jest grubością próbki, a  $n$  jest kolejnym numerem echa. W oparciu o pomiar grubości próbki oraz całkowity czas przelotu impulsu ultradźwiękowego  $t_c$  określany na podstawie różnicy rejestrowanych czasów przelotu  $t_1$  i  $t_2$  określa się prędkość fali ultradźwiękowej w badanym materiale.

### IV. Wprowadzenie teoretyczne

Częstości drgań sprężystych, jakim może być poddane jakieś ciało rozciągają się od bardzo niskich, związanych z rozmiarami ciała stałego, do bardzo wysokich ograniczonych od góry wielkością stałej sieciowej (odległością sąsiednich atomów). Zakres ten można umownie podzielić na częstości infradźwiękowe (poniżej 16Hz), częstości akustyczne (16 Hz – 16 kHz), ultradźwiękowe (16 kHz – 100 MHz), hiperdźwiękowe (100 MHz –  $10^{10}$  Hz).

Fala ultradźwiękowa rozchodzi się we wszystkich ośrodkach sprężystych. Ponieważ własności sprężyste ciał stałych są różne od cieczy i gazów, to i fale ultradźwiękowe w ciałach stałych różnią się od fal w ośrodkach ciekłych i gazowych. W cieczy i gazie rozchodzą się fale podłużne, natomiast w ciałach stałych mogą powstać zarówno fale podłużne jak i poprzeczne. Można wykazać, że ogólnie prędkość rozchodzenia się fali jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z iloczynu współczynnika sprężystości ośrodka  $\alpha$  i jego gęstości  $\rho$ :

$$v = \sqrt{\frac{1}{\alpha\rho}} \quad (1)$$

W szczególnym przypadku prędkości dla fali podłużnej  $V_L$  i poprzecznej  $V_T$  dla pręta o skończonych wymiarach, czyli porównywalnych z długością fali  $\lambda$  można wyrazić wzorami:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

gdzie:  $G$  – moduł sztywności (tzw. moduł sprężystości podłużnej),  $E$  – moduł Younga (tzw. moduł sprężystości poprzecznej)

Jednakże przy ściskaniu lub rozciąganiu pręta o rozmiarach nieograniczonych zmiana długości pociąga za sobą zmianę promienia i wtedy wyrażenia na prędkość opisane równaniami (2) przyjmują bardziej złożoną postać:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3)$$

gdzie:  $\mu$  - współczynnik Poissona opisany równaniem  $\mu = \frac{\Delta r}{r} / \frac{\Delta l}{l}$

## Ćwiczenie A-2: Wyznaczanie prędkości dźwięku w wybranych materiałach przy użyciu karty cyfrowej defektoskopu ultradźwiękowego

W gazie prędkość fali zależy od tego czy zmiany ciśnienia  $p$  zachodzą izotermicznie czy też adiabatycznie. W tym przypadku mamy:

$$V = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \qquad V = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} \qquad (4)$$

gdzie:  $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$  jest stosunkiem ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości.

Dla cieczy rolę modułu Younga lub ciśnienia odgrywa moduł ściśliwości cieczy  $K$  i wobec tego wzór na prędkość fali w cieczy przyjmuje postać:

$$V = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \qquad (5)$$

Ze wzoru (5) widać, że prędkość fali jest określona przez właściwości ośrodka, w którym fala się rozchodzi, zależy ona bowiem od  $K$  - cechy określającej sprężystość ośrodka oraz od gęstości  $\rho$  - cechy związanej z bezwładnością.

W tabelicy 1.1 podane są informacje o właściwościach akustycznych wielu ciał stałych. W ostatniej kolumnie podano wartość iloczynu prędkości fal podłużnych i gęstości ośrodka. Ten iloczyn jest miarą tzw. akustycznej oporności falowej ośrodka:  $m = \rho \cdot V_L$ . Warto znać prędkości fal podłużnych i poprzecznych w stali i PMM (stosowany w głowicach ultradźwiękowych) oraz w wodzie i w powietrzu a także akustyczne oporności falowe tych ośrodków. Wielkości te są zawarte w poniżej tabeli 2.

*Tabela 2. Wartości prędkości fal podłużnych i poprzecznych oraz akustycznej oporności falowej dla czterech ośrodków*

Lp.	Ośrodek	$V_L$ [m/s]	$V_T$ [m/s]	$\rho \cdot V_L$ [ $10^6$ ] [Pa·m/s]
1	stal	6000	3200	46
2	PMM	2700	1100	3,2
3	woda	1480	-	1,48
4	powietrze	330	-	0,003

**Ćwiczenie A-2: Wyznaczanie prędkości dźwięku w wybranych materiałach przy użyciu karty cyfrowej defektoskopu ultradźwiękowego**

*Tabela. 1.1. Dane akustyczne dla ciał stałych w temperaturze 20 °C*

Ośrodek	Gęstość $\rho$ $\times 10^3$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Współczynnik Poissona $\mu$	Prędkość fal ultradźwiękowych [m·s <sup>-2</sup> ]		Akustyczna oporność falowa $\rho V_L$ [Pa·s·m <sup>-1</sup> ]
			podłużnych $V_L$	poprzecznych $V_T$	
<b>METALE</b>					
beryl	-	-	12 540	8 825	-
cyna	7,30	0,33	3 320	1 670	$34,2 \times 10^6$
aluminium	2,70	0,34	6 320	3 080	$17,0 \times 10^6$
magnez	1,73	0,30	5 780	3 050	$10,0 \times 10^6$
kadm	8,60	0,30	2 780	1 500	$24,0 \times 10^6$
konstantan	8,80	0,33	5 240	2 640	$46,0 \times 10^6$
żeliwo	7,20	-	3 500 - 5600	2 200 - 3 200	25 - 40
mangan	8,40	0,33	4 660	2 350	$39,0 \times 10^6$
miedź	8,90	0,35	4 700	2 260	$42,0 \times 10^6$
mosiądz	8,10	0,35	3 820	2 123	$31,0 \times 10^6$
nikiel	8,80	0,31	5 630	2 960	$49,5 \times 10^6$
stal	7,80	0,28	5 900-6 000	3 260	$46,3 \times 10^6$
ołów	11,40	0,44	2 160	700	$24,6 \times 10^6$
platyna	21,40	0,39	3 960	1 670	$84,6 \times 10^6$
rtęć	13,60	-	1 450	-	$20,0 \times 10^6$
srebro	10,50	0,38	3 600	1 590	$38,0 \times 10^6$
bismut	9,80	0,33	2 180	1 100	$21,4 \times 10^6$
wolfram	19,10	0,35	5 460	2 620	$104,2 \times 10^6$
cynk	7,10	0,25	4 170	2 410	$29,6 \times 10^6$
złoto	19,30	0,42	3 240	1 200	$62,6 \times 10^6$
<b>NIEMATALE</b>					
guma miękka	0,90	-	1 479	-	$1,4 \times 10^6$
guma twarda	1,20	-	2 405	-	$2,9 \times 10^6$
ceramika	-	-	3 000 - 6 500	-	-
lód	1,00	0,33	3 980	1 990	$3,2 \times 10^6$
parafina	0,83	-	2 200	-	$1,8 \times 10^6$
polimeta-akrylan metylu (PMMA)	1,18	0,35	2 670	1 121	$3,2 \times 10^6$
polistyren	1,06	0,32	2 350	1 120	$2,3 \times 10^6$
polietylen	1,10	-	2 480	-	$2,7 \times 10^6$
porcelana	2,40	-	5 300-5 500	-	$13,0 \times 10^6$
szkło kwarcowe	2,60	0,17	5 570	3 515	$14,5 \times 10^6$
teflon	2,20	-	1 350	-	$3,0 \times 10^6$
<b>SKAŁY</b>					
bazalt	2,72	0,30	5 930	3 140	$16,2 \times 10^6$
łupek	2,74	0,277	6 500	3 610	$17,8 \times 10^6$
gips	2,26	0,338	4 790	2 370	$10,8 \times 10^6$
marmur	2,66	0,305	6 150	3 260	$16,4 \times 10^6$
mika	2,81	0,458	7 760	2 160	$21,8 \times 10^6$
granit	2,62	0,18	4 450	2 780	$11,6 \times 10^6$

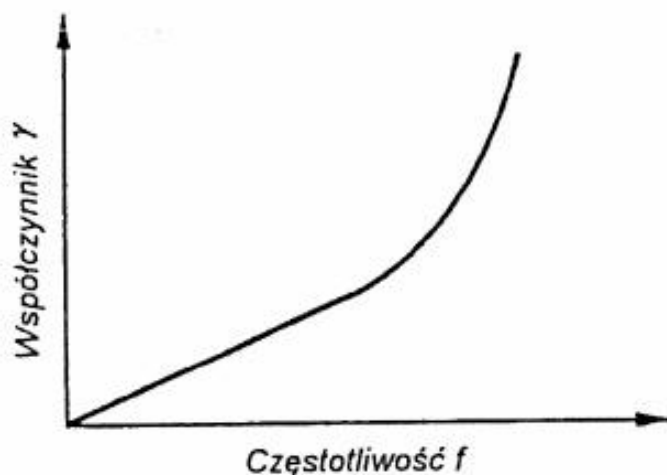
## Ćwiczenie A-2: Wyznaczanie prędkości dźwięku w wybranych materiałach przy użyciu karty cyfrowej defektoskopu ultradźwiękowego

Dotychczasowe rozważania dotyczyły o rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w ośrodku doskonale sprężystym. W ośrodku takim potencjalna energia sprężysta przechodzi bez strat w energię kinetyczną ruchu drgającego cząsteczki ośrodka i odwrotnie. Na skutek tarcia wewnętrznego, przewodnictwa cieplnego itp. część energii podczas tej przemiany jest jednak stale tracona. W rezultacie natężenie fali zmniejsza się w funkcji odległości  $x$ . W takim przypadku, mówi się, że fala jest tłumiona. Za miarę tłumienia przyjmuje się współczynnik tłumienia  $\gamma$ , który określany jest jako względna zmiana natężenia fali przypadając na jednostkę długości. Wówczas natężenie fali płaskiej  $I$  w funkcji odległości  $x$  można opisać wyrażeniem:

$$I = I_0 e^{-\gamma x}$$

gdzie:  $I_0$  jest natężeniem fali w odległości  $x=0$ .

Współczynnik tłumienia jest wielkością zależną od rodzaju ośrodka oraz ponadto od częstotliwości fali. Dla niskich częstotliwości w ośrodkach stałych współczynnik tłumienia wzrasta liniowo wraz z częstotliwością. W tym zakresie częstotliwości dominują straty energii na skutek przewodnictwa cieplnego. Dla wysokich częstotliwości zależność ta przechodzi w parabolę (patrz rys. 2).



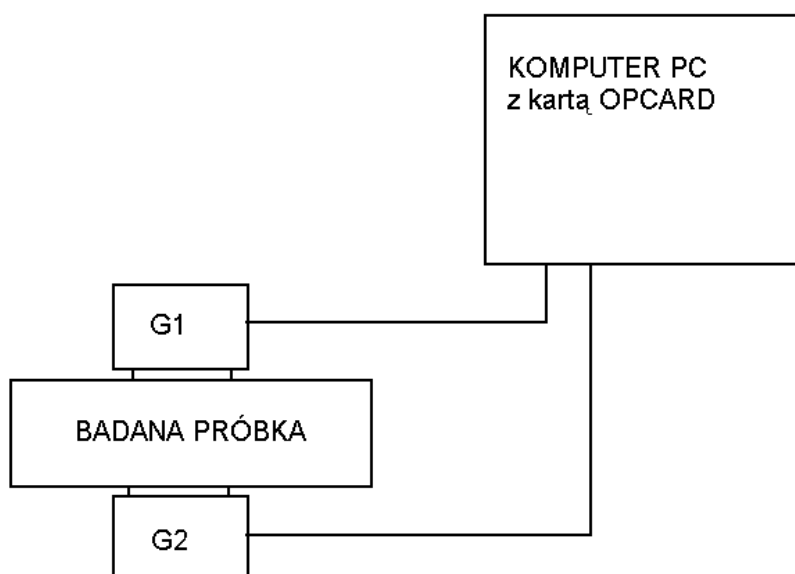
Rys. 2. Typowa zależność współczynnika tłumienia od częstotliwości dla ośrodków stałych

## V. Zestaw pomiarowy

Główną część układu stanowią dwie głowice ultradźwiękowe  $G_1$  (nadajnik) i  $G_2$  (odbiornik) zamontowane na szynie, która umożliwia umieszczenie pomiędzy nimi próbek badanych materiałów. Głowice ultradźwiękowe zintegrowane są z komputerem PC z zainstalowaną kartą ultradźwiękową OPCARD. W skład zestawu pomiarowego wchodzi zestaw próbek (w postaci prostokątów i walców) z aluminium, miedzi, stali, pleksi oraz kuleta z wodą oraz suwmiarka.

Schemat układu doświadczalnego przedstawiono na rys. 3.

Ćwiczenie A-2: Wyznaczanie prędkości dźwięku w wybranych materiałach przy użyciu karty cyfrowej defektoskopu ultradźwiękowego



Rys. 3. Schemat układu do pomiaru prędkości dźwięku przy użyciu karty ultradźwiękowej OPCARD

## VI. Przebieg ćwiczenia

**WAŻNE:** Zapoznać się z instrukcją obsługi programu dla karty ultradźwiękowej OPCARD (plik Instrukcja\_obsługi\_karty\_OPCARD)

1. Uruchomić program OPCARD, umiejscowiony na pulpicie.
2. Za pomocą suwmiarki zmierzyć grubość danej próbki z dokładnością do dziesiątych części mm.
3. Umieścić próbkę pomiędzy głowicami ultradźwiękowymi G<sub>1</sub> (nadajnik) i G<sub>2</sub> (odbiornik). Dla lepszego przylegania głowic do próbki, wcześniej lekko zwilżyć podstawę próbki wodą lub olejem.
4. W oknie programu w polu *Thickness* (grubość) wprowadzić wartość zmierzonej wcześniej grubości próbki (patrz rys. 4)

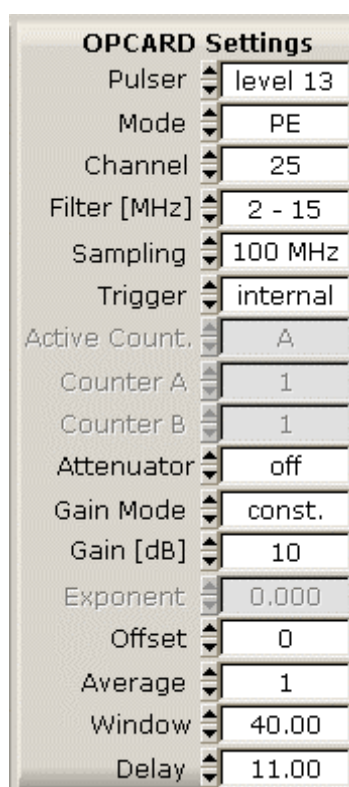


Rys. 4. Okno dialogowe ze środkowej części ekranu programu

5. Lekko dociskając głowice ultradźwiękowe do próbki uruchomić pomiar przyciskiem START/STOP lub klawiszem funkcyjnym F1 z klawiatury.
6. Ustawić parametry pracy karty defektoskopu ultradźwiękowego w obszarze panelu głównego programu:
  - jednostka osi Y - [V]
  - sygnał - [HV] (sygnał przemienny)
  - jednostka osi X - [μs]
7. W opcjach panelu bocznego programu (patrz rys. 5) ustawić odpowiednie parametry dla badanego materiału takie jak:

## Ćwiczenie A-2: Wyznaczanie prędkości dźwięku w wybranych materiałach przy użyciu karty cyfrowej defektoskopu ultradźwiękowego

- ustawić amplitudę sygnału z zakresu 1-15 (*Pulser*),
- wybrać tryb pracy (*Mode*), TT- tryb Through Transmission – w tym przypadku pracują obydwie głowice jedna jako nadajnik, druga jako odbiornik,
- kanał ustawić na 1 (*Chanel*),
- określić właściwe zakres pasma przepustowości filtrów analogowych dla głowic 4 MHz (*Filtr [MHz]*),
- ustawić częstotliwości próbkowania (*Sampling*), np. na 50 MHz
- w pozycji (*Trigger*) (wyzwalanie) ustawić opcję *internal*,
- w pozycji (*Attenuator*) ustawić opcję *off*,
- opcję (*Gain Mode [Db]*) ustawić w pozycji *const*,
- w pozycji (*Gain*) (wzmocnienie) dobrać eksperymentalnie właściwą wartość, w celu uzyskania wyraźnego sygnału echa,
- ustawić opcję (*Offset*) na wartość *zero*,
- uśrednienie pomiarów (*Average*) ustawić na 32,
- wartość liczbową okna (*Window*) dobrać indywidualnie dla każdej próbki, tak aby widoczne były przynajmniej dwa echa,
- wartość opcji (*Delay*) początkowo ustawić na *zero*.



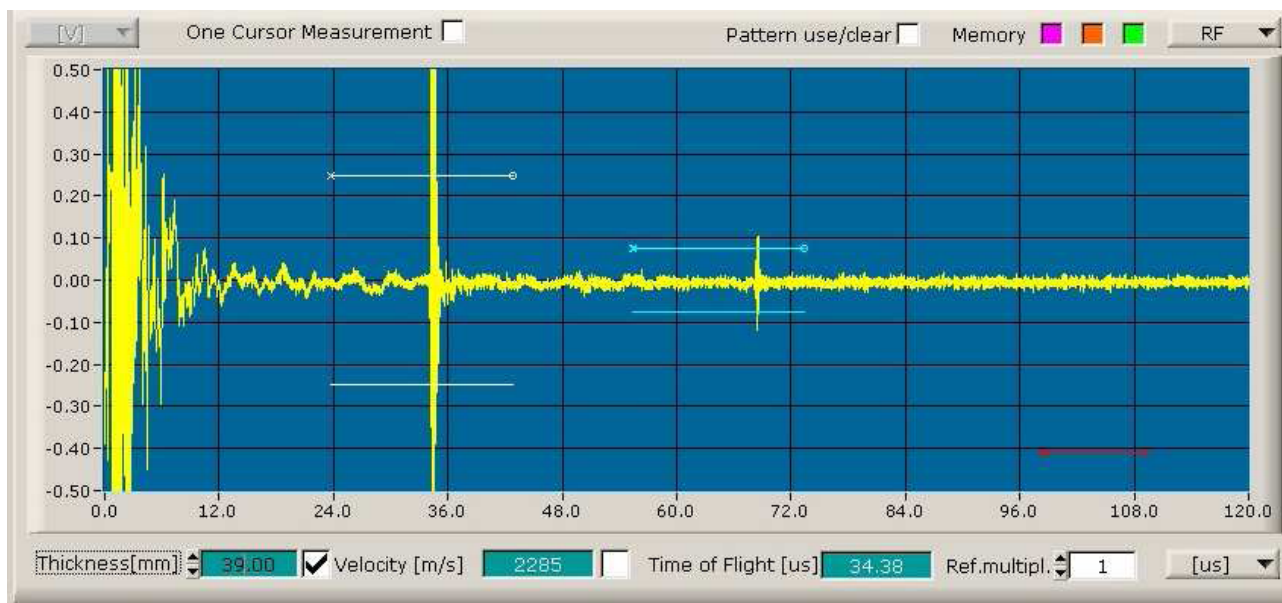
Rys. 5. Przykładowe ustawienia parametrów w panelu bocznym programu

8. W środkowej części ekranu zaznaczyć jako aktywne pole dialogowe (*Thickness*).
9. Dla prawidłowego przeprowadzenia pomiaru ustawić bramki pomiarowe białą i niebieską na dwóch sąsiednich echach (jako pierwszą od lewej ustawić bramkę białą, w ten sposób aby przecinała obraz echa, jako drugą ustawić bramkę niebieską w



## Ćwiczenie A-2: Wyznaczanie prędkości dźwięku w wybranych materiałach przy użyciu karty cyfrowej defektoskopu ultradźwiękowego

taki sam sposób). Jeśli wybrane do pomiaru zostały dwa sąsiednie echa w pozycji *Ref. Multipol.* ustawić wartość 1 (patrz rys. 6.).



**Rys. 6. Prawidłowe ustawienie bramek pomiarowych w programie**

10. Odczytać wartości prędkości dźwięku  $V_{zm}$  (*Velocity*) oraz czas  $t_1$  przejścia sygnału przez próbkę. Wyniki wpisać do tabeli 1.
11. Następnie przenieść białą bramkę na drugie echo i odczytać z okna dialogowego czas  $t_2$  przejścia sygnału przez materiał, a wynik zarejestrować w tabeli 1.
12. Oszacować niepewności pomiarowe grubości próbki  $\Delta L$ , prędkości fali dźwiękowej  $\Delta V$  oraz czasów przelotu  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ .
13. Zakończyć pomiar naciskając klawisz funkcyjny F1 lub przycisk START/STOP.
14. Zarejestrować kopie ekranu w celu dokumentacji i ilustracji wyników badań poprzez naciśnięcie klawisza *PrtScn* i zapisać je na dowolnym nośniku.
15. Doświadczenie przeprowadzić jak w pkt. 2-14 również dla czterech innych materiałów takich jak pleksi, stal, aluminium oraz woda. Wyniki pomiarów zarejestrować w tabeli 1.
16. Zamknąć program klawiszem F10 – EXIT.

## **V. Tabela pomiarowa**

**Tabela 1.**

Lp.	materiał	$L [mm]$	$V_{zm} \left[ \frac{m}{s} \right]$	$t_1 [\mu s]$	$t_2 [\mu s]$	$t_c [\mu s]$
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						

## VI. Opracowanie wyników

1. Obliczyć prędkość fali ultradźwiękowej ze wzoru:

$$V_{obl} = \frac{2nL}{t_c}$$

gdzie:  $n$  – numer echa

$$t_c = t_2 - t_1$$

Wyniki wpisać do tabeli 2.

2. Określić błąd maksymalny prędkości fali ultradźwiękowej metodą różniczeki zupełnej:

$$\Delta V_{obl} = V_{obl} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta t_c}{t_c} \right)$$

gdzie:  $\Delta t_c = \Delta t_2 + \Delta t_1$

3. Oszacować błąd względny procentowy prędkości fali ultradźwiękowej ze wzoru:

$$\delta_{V_{obl}} = \frac{\Delta V_{obl}}{V_{obl}} \cdot 100\%$$

4. Zapisać wartość  $V_{obl}$  z uwzględnieniem niepewności pomiarowej i zgodnie z zasadą zaokrąglania wyników.
5. Dla każdego kolejnego materiału przeprowadzić obliczenia wg pkt. 1-3, a także zestawzić wartości prędkości fali ultradźwiękowej z wartościami ich błędów bezwzględnych  $\Delta V_{obl}$ .
6. Otrzymane wyniki zarejestrować w tabeli 2.

**Tabela 2. Wyniki pomiarów i obliczeń prędkości fali ultradźwiękowej w różnych materiałach**

Lp.	materiał	$V_{zm} \left[ \frac{m}{s} \right]$	$V_{obl} \left[ \frac{m}{s} \right]$	$\Delta V_{obl} \left[ \frac{m}{s} \right]$	$\delta_{V_{obl}}$
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					

## Literatura

1. R. Resnick, D. Halliday, J. Walker, Podstawy fizyki, T. 2, PWN, Warszawa 2005
2. F.C. Grawford, Fale rozdz. 4., PWN, Warszawa, 1975
3. H. Szydłowski, Pracownia Fizyczna, PWN Warszawa 1973 i późn.
4. J. Lech Opracowanie wyników pomiarów w laboratorium podstaw fizyki, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Częstochowa 2005.
5. Instrukcja\_obsługi\_karty\_OPCARD.pdf