

4.7 Pomiar prędkości dźwięku w metalach metodą echa ultradźwiękowego (F9)

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie prędkości dźwięku w wybranych metalach na podstawie pomiarów metodą echa ultradźwiękowego.

Zagadnienia do przygotowania:

- rozchodzenie się fal sprężystych w różnych ośrodkach;
- fale dźwiękowe (ultradźwięki), rodzaje fal ultradźwiękowych;
- metoda echa ultradźwiękowego;
- wyznaczanie prędkości dźwięku w metalach;
- współczynniki sprężystości ośrodka (moduł Younga).

Literatura podstawowa: [5], [22].

4.7.1 Podstawowe pojęcia i definicje

Podstawowe pojęcia i definicje dotyczące rozchodzenia się fal w ośrodku sprężystym opisane są w rozdziale 4.3.1.

Prędkość rozchodzenia się fali mechanicznej w ciele stałym

Rodzaj fal mechanicznych mogących się rozchodzić w danym ośrodku zależy od właściwości sprężystych tego ośrodka. Ciało stałe jest ośrodkiem, który ulega zarówno odkształceniu objętościowemu (ściśliwość), jak i odkształceniu postaci (sztywność). Mogą się więc w nim rozchodzić zarówno fale podłużne, jak i poprzeczne.

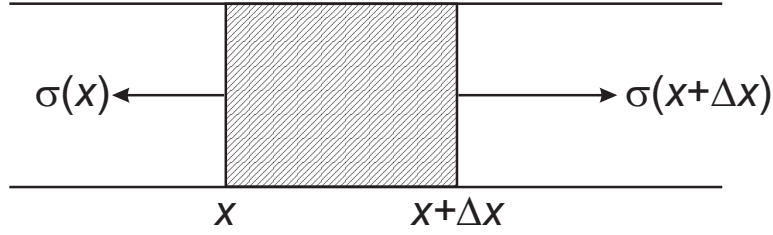
Żałómy, że fala rozchodzi się w kierunku x , a drgania zachodzą w kierunku y . Falę taką opisuje falowe równanie różniczkowe (4.3.1), którego rozwiązaniem może być np. równanie fali:

$$y = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{u} \right) \right], \quad (4.7.1)$$

gdzie $u = \lambda T^{-1} = \lambda f$ jest prędkością rozchodzenia się fali w danym ośrodku. Równanie (4.3.1) stosuje się do wszystkich rodzajów drgań sprężystych, zarówno poprzecznych jak i podłużnych.

Rozważmy pręt metalowy ułożony wzdłuż osi x , o gęstości ρ i przekroju poprzecznym S . Pręt poddano odkształceniu, wywierając nacisk w kierunku osi x . Odkształcenie to jest przekazywane dzięki naprężeniom σ powstającym w pręcie i przemieszcza się ono wzdłuż pręta z prędkością u (rysunek 4.7.1). Jeżeli wybierzemy element masy pręta pomiędzy płaszczyznami w punktach x i $x + \Delta x$, to środek masy tego elementu ulegnie przemieszczeniu $\xi(x, t)$, czyli w pręcie rozchodzi się fala podłużna. Można napisać równanie ruchu dla tego elementu pręta:

$$\rho S \Delta x \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = S \sigma(x + \Delta x) - S \sigma(x), \quad (4.7.2)$$



Rys. 4.7.1: Naprężenie w odkształconym pręcie.

stąd:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\sigma(x + \Delta x) - \sigma(x)}{\Delta x}, \quad (4.7.3)$$

a dla $\Delta x \rightarrow 0$ lewą stronę równania możemy zastąpić przez pochodną:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}. \quad (4.7.4)$$

Ale według prawa Hooke'a

$$\sigma = E\epsilon, \quad (4.7.5)$$

gdzie E oznacza moduł Younga, a ϵ - odkształcenie względne:

$$\epsilon = \frac{\partial \xi}{\partial x}. \quad (4.7.6)$$

Zatem ostatecznie:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}. \quad (4.7.7)$$

Ostatnie równanie jest różniczkowym równaniem falowym dla podłużnej fali sprężystej, rozchodzącej się w metalowym pręcie. Porównując je z równaniem (4.3.1) można znaleźć prędkość rozchodzenia się fali podłużnej:

$$u_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (4.7.8)$$

W podobny sposób można wyprowadzić różniczkowe równanie falowe dla fal poprzecznych w pręcie. Odpowiedni wzór wyrażający prędkość rozchodzenia się fali poprzecznej ma postać:

$$u_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (4.7.9)$$

gdzie G oznacza moduł sztywności. Moduł sztywności wiąże ze sobą naprężenie ścinające τ (siłę podzieloną przez wielkość powierzchni stycznej do kierunku działającej siły) z odkształceniem ścinania wyrażonym przez kąt skręcenia θ :

$$\tau = G\theta. \quad (4.7.10)$$

Wydłużeniu ciała pod działaniem naprężenia towarzyszy zmniejszenie wymiarów w kierunku poprzecznym. Względna zmiana wymiaru poprzecznego jest proporcjonalna do względnego wydłużenia w kierunku działającego naprężenia. Współczynnikiem proporcjonalności jest współczynnik Poissona ν . Dla ciał izotropowych moduł Younga E , moduł sztywności G oraz współczynnik Poissona ν powiązane są ze sobą przez relację:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (4.7.11)$$

Można więc prędkość fal poprzecznych wyrazić jako:

$$u_{\perp} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}}. \quad (4.7.12)$$

Prędkość rozchodzenia się fal podłużnych w ośrodku o dużych rozmiarach poprzecznych jest inna niż w cienkim przecie. Rozmiary poprzeczne uznaje się jako duże, jeżeli są one większe od długości fali dźwiękowej. W ośrodku takim każdy element objętości ulega odkształceniom tylko w kierunku podłużnym. Prędkość rozchodzenia się fal podłużnych wynosi wtedy:

$$u_{\parallel} = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}, \quad (4.7.13)$$

natomiast prędkość rozchodzenia się fal poprzecznych jest wyrażana nadal równaniem (4.7.9).

4.7.2 Przebieg pomiarów

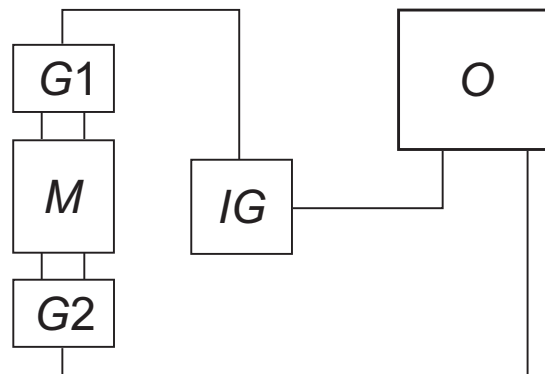
Układ pomiarowy

Do wykonania ćwiczenia służy układ doświadczalny, w którego skład wchodzi: dwie głowice ultradźwiękowe $G1$ i $G2$, impulsowy generator wysokiej częstotliwości IG , oscyloskop O , zestaw próbek z aluminium, mosiądzu i stali M . Ten układ doświadczalny, którego schemat przedstawiono na rysunku 4.7.2 pozwala na wyznaczenie prędkości dźwięku w metalach metodą echa ultradźwiękowego.

Metoda pomiarowa

Główną część aparatury stanowią dwie głowice ultradźwiękowe $G1$ i $G2$ zamontowane w statywie, który umożliwia umieszczenie między nimi próbek badanych metali.

Pomiar prędkości dźwięku w metalach metodą echa ultradźwiękowego (29)

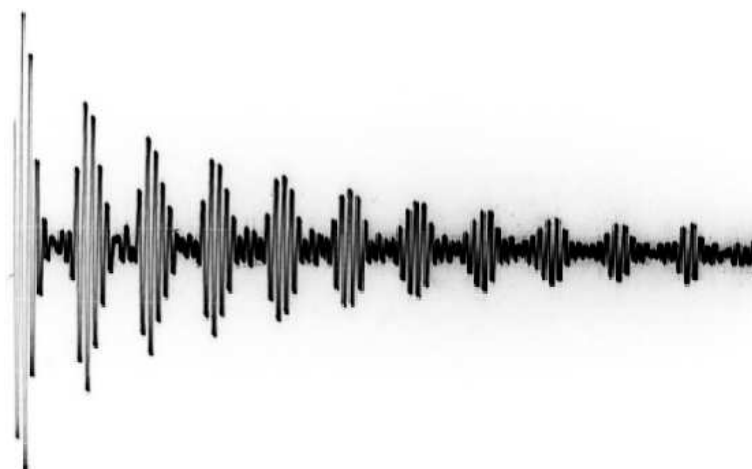


Rys. 4.7.2: Schemat blokowy układu doświadczalnego do wyznaczania prędkości dźwięku w ciele stałym.

Dolna głowica zamocowana jest w ten sposób, aby mogła dopasowywać się do ewentualnych nierównoległości podstaw mierzonych próbek. Na dolnej głowicy umieszcza się badaną próbkę i do jej górnej powierzchni dociska górną głowicę. Dla lepszego przylegania, podstawy próbek smarowane są lekko olejem. Na jedną z głowic ultradźwiękowych jest podawany prostokątny impuls z generatora *IG*, a druga głowica stanowi głowicę odbiorczą. Obydwa sygnały podawane są na wejście oscyloskopu *O*. Przy włączonej podstawie czasu, na ekranie oscyloskopu otrzymuje się szereg równoodległych impulsów, których amplitudy maleją eksponencjalnie (patrz rysunek 4.7.3). Pierwszy sygnał odpowiada sytuacji, kiedy impuls z generatora przeszedł przez całą długość próbki i został zarejestrowany przez głowicę odbiorczą. Drugi i wszystkie następne 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 odbite od zewnętrznej powierzchni styczącej do głowicy nadawczej dotarły do głowicy odbiorczej. Im więcej kolejnych odbić od zewnętrznych powierzchni próbki, tym mniejsza amplituda sygnału. Pierwsze echo daje impuls, który przebiegł dodatkowo dwa razy długość próbki w porównaniu z pierwszym, obserwowanym na ekranie oscyloskopu. Drugie echo odpowiada dodatkowemu czterokrotnemu przejściu generowanego impulsu przez próbkę itd. Ogólnie – dodatkowa droga przebyta przez impuls w badanym materiale jest równa $2nl$, gdzie l jest grubością próbki, n jest kolejnym numerem echa.

Prędkość dźwięku w metalach można wyznaczyć znając drogę i czas potrzebny na jej przebycie w badanym materiale. Z obrazu obserwowanego na ekranie oscyloskopu, gdzie widoczne są kolejne echa (rysunek 4.7.3) określa się czasy przelotu generowanego impulsu przez próbkę. Natomiast, do określenia drogi sygnału w materiale wystarczy znajomość grubości próbki.

Układ doświadczalny umożliwi również zobrazowanie zasady działania defektoskopu ultradźwiękowego. W próbkach o większych rozmiarach występują defekty struk-



Rys. 4.7.3: Prawidłowy obraz ciągu sygnałów echa ultradźwiękowego obserwowany na ekranie oscyloskopu dla próbki stalowej.

tury wewnętrznej, które powodują dodatkowe odbicia impulsów ultradźwiękowych. To z kolei prowadzi do powstawania na ekranie oscyloskopu dodatkowych obrazów echa, jednakże wartości amplitud i ich odległości od innych sygnałów nie spełniają omawianych wcześniej zależności.

Przebieg doświadczenia

Zapoznać się z układem doświadczalnym i zmontować go według schematu przedstawionego na rysunku 4.7.2. Zmierzyć grubości i średnice wszystkich badanych próbek oraz wyznaczyć ich masy.

Zamontować próbkę pomiędzy głowicami ultradźwiękowymi. Zaobserwować obraz echa na ekranie oscyloskopu. Ustawić prawidłowy obraz tak, aby impulsy były równo odległe a ich amplitudy zanikały eksponencjalnie.

Zmierzyć za pomocą oscyloskopu czas przelotu impulsu ultradźwiękowego przez próbkę dla dróg $s = 2nl$ (l – grubość próbki, n – numer echa), co sprowadza się do pomiaru odległości pomiędzy pierwszym sygnałem, a kolejnymi echami dla znanego zakresu podstawy czasu. Pomiar powtórzyć dla 3 próbek z każdego rodzaju materiału (stal, miedź, aluminium).

4.7.3 Opracowanie wyników

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów czasów przelotu t impulsów i długości dróg s przez nie przebytych w materiale jednego rodzaju, wykonać wykresy zależności $s(t)$ (dla każdego badanego materiału osobno). Dopasować proste ($s = at + b$) metodą regresji liniowej. Na podstawie otrzymanych współczynników regresji znaleźć

Pomiar prędkości dźwięku w metalach metodą echa ultradźwiękowego (203)

prędkości dźwięku w każdym badanym materiale. Porównać z wartościami z tabeli 4.7.1.

Tabela 4.7.1: Dane akustyczne dla ciał stałych w temperaturze 20°C

Ośrodek	Gęstość ρ $\cdot 10^3 [kg\ m^{-3}]$	Moduł Younga E $\cdot 10^{10} [N\ m^{-2}]$	Prędkość podłużnych fal ultradźwiękowych $u [m\ s^{-1}]$
Aluminium	2.7	6.2-7.3	6320
Mosiądz	8.1	10.3	3830
Stal	7.8	21.5	5900–6000

Korzystając ze zmierzonych rozmiarów próbek oraz ich mas wyznaczyć gęstości badanych materiałów. Obliczyć wartości modułu Younga dla badanych materiałów korzystając z wyznaczonych gęstości i prędkości. Oszacować niepewności pomiarowe wyznaczanych wielkości. Otrzymane wyniki porównać z wartościami tablicowymi.