

# **Badania ultradźwiękowe w masach samo i szybkoutwardzalnych**

Pracownia Technologii Formy

Wydział Odlewnictwa AGH

## **1. Fale ultradźwiękowe w ośrodkach porowatych - wielofazowych**

Na świecie ultradźwięki stosuje się w wielu technologiach i powszechnie są używane w celach diagnostycznych. Wykorzystuje się je w wielu dziedzinach przemysłu, są ważnym narzędziem elektroniki, telekomunikacji czy inżynierii materiałowej. Ultradźwięki znajdują ciągle nowe zastosowania sprzyjające modernizacji przemysłu.

Historie ultradźwięków możemy określić na blisko 200 lat. Za narodziny ultradźwięków możemy przyjąć chwilę sztucznego ich wytworzenia za pomocą syreny przez Cagnarda de la Toura w 1819 roku. Drugim przełomowym momentem było wyznaczenie przez Galtona w 1883 roku, za pomocą skonstruowanej piszczałki, górnej granicy słyszalności. Piszczałka Galtona dla wielu badaczy do roku 1930, była podstawowym narzędziem do badań przeprowadzanych z ultradźwiękami i stanowiła wzorcowe źródło ultradźwięków w zakresie częstotliwości do 50 kHz. Istotnym przełomem dla praktycznych zastosowań ultradźwięków były prace Langevina z 1917 roku. Wykorzystał on zjawisko piezoelektryczne w kryształach kwarcu do generacji i detekcji ultradźwięków w cieczech. Generatory Langevina umożliwiły wytwarzanie fal ultradźwiękowych o dużych natężeniach i częstotliwościach radiowych, co pozwoliło na rozpoczęcie wielu badań i wykrycie procesów występujących w wyniku oddziaływania fal ultradźwiękowych materię, określić mechanizm ich rozchodzenia się i absorpcji [1].

Zastosowanie ultradźwięków jest szerokie, ogólnie można powiedzieć że obejmują dwie dziedziny, które określamy jako bierne i czynne w zależności od ich oddziaływania na środowisko w którym się rozchodzą. Wśród biernych zastosowań

najważniejsze są spektroskopia i defektoskopia ultradźwiękowa, medyczna diagnostyka ultradźwiękowa i hydrolokacja. Coraz częściej wykorzystuje się fale ultradźwiękowe do badania kinetyk utwardzania różnego rodzaju substancji. Wśród czynnych zastosowań wymienić trzeba koagulację i dyspergowanie ultradźwiękowe, medyczna terapia ultradźwiękową, kawitację, wywoływanie sonoluminescencji czy reakcji chemicznych. Inne czynne zastosowanie to rozkruszanie i formowanie ośrodków twardych, spajanie, lutowanie, mycie, ekstrakcję i suszenie substancji [1,2].

## **1.1 Propagacja fal ultradźwiękowych w materiałach porowatych**

Propagacja fal ultradźwiękowych w porowatych materiałach jest badana od wielu lat. Pierwszym badaczem, który stworzył podstawową teorię propagacji fal ultradźwiękowych w nasyconym płynem porowatym materiale jest Biot [3,4]. Jego teoria podaje że istnieją dwie fale kompresyjne - fala szybka (P1-wave) i fala wolna (P2-wave). Kolejni badacze jak Plona [5] i Berryman [6] stopniowo potwierdzili teorię Biota przez eksperymenty. Następnie, wielu badaczy prowadziło dyskusje nad propagacją fal w takich ośrodkach, gdyż odbicie i przesłanie fal ultradźwiękowych przez materiał porowaty jest ważne zarówno z punktu widzenia zastosowania, ale także teoretycznego poznania zjawiska.

Współcześni badacze również zajmują się problematyką propagacji fal ultradźwiękowych w mediach (w szczególności materiałach porowatych). Soczkiewicz i Chivers [7-9] w swoich pracach prezentują propagację i tłumienie fal w niejednorodnym materiale. Edelman [10,11] prezentuje model matematyczny rozchodzenia się fal powierzchniowych niskiej częstotliwości - fal Stonleya - w materiale porowatym. Badania nad absorpcją i propagacją fal ultradźwiękowych w materiałach podwójnie porowatych prowadzą Boutin i współautorzy [12]. Mozhaev i Weihnacht [13] badają rozchodzenie się fal Rayleigha na granicy ciecz - ciało stałe..

Podsumowując od czasu gdy Biot przedstawił teorię rozchodzenia się fal w materiałach porowatych, wielu naukowców badało tą problematykę. Coraz lepsze poznanie zjawisk propagacji fal i absorpcji ich przez różnego rodzaju ośrodki (materiały) - zwłaszcza ośrodki porowate, pozwoliło na efektywniejsze wykorzystanie fal ultradźwiękowych w badaniach tychże materiałów, a także w poznawaniu i monitorowaniu zjawisk fizycznych i chemicznych zachodzących w nich.

## 1.2 Podział fal ultradźwiękowych

Fale ultradźwiękowe rozróżniamy ze względu na kierunek drgań cząsteczek ośrodka w stosunku do kierunku rozchodzenia się fali i możemy je podzielić na [1,14-18]:

- Fala podłużna
- Fala poprzeczna
- Fala powierzchniowa - Rayleigha
- Fala podpowierzchniowa
- Fala płytowa - Lamba
- Fala Love'a

W badaniach najczęściej wykorzystuje się fale podłużne, poprzeczne i powierzchniowe.

Fala podłużna rozchodzi się w każdym ośrodku materialnym. W trakcie przejścia fali cząstki ośrodka drgają prostoliniowo, tak jak kierunek rozchodzenia się fali, powodując naprzemienne zagęszczanie i rozrzedzanie cząstek. Przechodząca fala powoduje także oscylacyjne zmiany objętości ośrodka. Aby uzyskać czystą falę podłużną, wymiary ośrodka w stosunku do długości fali  $\lambda$  muszą być odpowiednio duże. Fala oznaczana jest za pomocą litery L, a jej prędkość przez  $c_L$ . W odróżnieniu od fali podłużnej, fala poprzeczna zwana również ścienną, nie powoduje zmian gęstości ośrodka, cząstki drgają w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali. Powoduje natomiast powstawanie naprężeń stycznych. Oznaczamy ją literą T, a jej prędkość przez  $c_T$ . Prędkość fali poprzecznej w danym ośrodku jest zawsze mniejsza od fali podłużnej. Fala ścienna rozchodzi się tylko w ośrodkach stałych. Fala powierzchniowa - Rayleigha jest szczególnym przypadkiem fali poprzecznej. Rozchodzi się na powierzchni swobodnej ciała stałego, wnikając w nie na głębokość około jednej długości fali  $\lambda$ . Cząsteczki drgają w dwóch płaszczyznach - prostopadle i równolegle do kierunku rozchodzenia się fali, przy czym wartość składowej prostopadłej jest dużo większy od składowej równoległej. W wyniku czego ruch cząstek przebiega po smukłej elipsie. Fale Rayleigha oznaczamy literą R a jej prędkość przez  $c_R$ . Fala powierzchniowa w danym ośrodku ma najmniejszą prędkość -  $c_R < c_T < c_L$  [1,14-18].

### 1.3 Fale ultradźwiękowe w ośrodkach liniowo-sprężystych

Ciała stałe są jedynymi ośrodkami w których mogą rozchodzić się wszystkie rodzaje fal ultradźwiękowych, gdyż posiadają dużo mocniejsze wiązania międzyatomowe, czym różnią się od cieczy i gazów. Struktura sieci ciał stałych wpływa na prędkość rozchodzenia się fal. W przypadku ciał anizotropowych, jakimi są kryształy, kierunek rozchodzenia się fali wpływa na jej prędkość. Natomiast dla ciał izotropowych, podobnie jak w przypadku cieczy, prędkość przemieszczania się fali ultradźwiękowej jest taka sama, niezależnie od kierunku jej przemieszczania się. Dzieje się tak dlatego, gdyż ciała izotropowe są bezpostaciowe - czyli o podobnej do cieczy strukturze sieci, albo mają budowę polikrystaliczną - duża liczba ziaren krystalicznych zorientowanych przypadkowo [1,14,15].

W przypadku fali podłużnej, prędkość  $c_L$  rozchodzenia się jej w ciałach stałych zależy od stosunku długości fali  $\lambda$  i rozmiarów ośrodka [1,14,15].

- Ośrodek nieograniczony  $a \gg \lambda$ ,  $b \gg \lambda$

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \text{ [m*s}^{-1}\text{]} \quad (1)$$

gdzie:

E - moduł sprężystości wzdłużnej [Pa],

$\rho$  - gęstość materiału [ $\text{kg*m}^{-3}$ ]

$\nu$  - liczba Poissona;

- Ośrodek ograniczony, w którym jeden lub dwa wymiary (a,b) prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali są ograniczone

➤ Płyta:  $a \gg \lambda$ ,  $b \ll \lambda$

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1}{1-\nu^2}} \quad (2)$$

➤ Płyta:  $a \ll \lambda$ ,  $b \ll \lambda$

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

Dla fali poprzecznej jej prędkość rozchodzenia się ( $c_T$ ) w ciałach stałych wyraża wzór:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad [\text{m*s}^{-1}] \quad (4)$$

gdzie: G - moduł sprężystości poprzecznej [Pa]

W przypadku fali powierzchniowej prędkość rozchodzenia się fali  $c_R$  opisuje wzór:

$$c_R \approx \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu} \quad (5)$$

i jest zawsze mniejsza o 5 - 10 % od prędkości fali poprzecznej  $c_T$ .

Dla częstotliwości fal ultradźwiękowych, które są używane w defektoskopii i technice pomiarowej, czyli od 20 kHz do 20 MHz prędkość rozchodzenia się fal podłużnych, poprzecznych i powierzchniowych jest niezależna od jej częstotliwości [1,14,15].

## 1.4 Fale ultradźwiękowe w ośrodkach porowatych

### 1.4.1 Prędkość rozchodzenia się fali

Rozchodzenie się fal akustycznych, płaskich w ośrodku idealnie sprężystym, czyli bez strat energii, wyraża się równaniem [1]:

$$\frac{\delta^2 \varphi}{\delta^2 x} = \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 \varphi}{\delta t^2} \quad (6)$$

gdzie:

$\varphi$  - zmienna charakteryzująca ośrodek lub rozchodzącą się w nim falę

c - prędkość fali

W przypadku przebiegów okresowych zmienna  $\varphi$  jest równa ciśnieniu akustycznemu - ( $\rho * c$ ), a także pozwala wyznaczyć składowe prędkości cząstkowej [1,14].

Masy formierskie, podobnie jak ośrodki skalne, nie są ośrodkami idealnie sprężystymi i w związku z tym nie można stosować bezpośrednio równania ruchu falowego. Niedoskonała sprężystość tychże materiałów powoduje wewnętrzne tarcia, które powodują zmianę części energii na ciepło, co wywołuje tłumienie i dyspersję prędkości fal sprężystych w takim ośrodku.

Matematyczne ujęcie niedoskonałości ośrodka sprężystego jest przedstawiane przez badaczy na różne sposoby. Jednym jest zastąpienie równania stanu ośrodka idealnie sprężystego przez układ równań opisujących naprężenia i odkształcenia. Po rozwiązaniu układu równań różniczkowych, równanie płaskiej podłużnej fali przemieszczającej się w ośrodku niedoskonale sprężystym - z tłumieniem, przyjmuje postać [1,14]:

$$\frac{\delta^2 \varphi}{\delta^2 x} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \varphi \quad (7)$$

gdzie:

$\lambda, \mu$  - współczynniki tarcia wewnętrznego - stałe Lamego

$\rho$  - gęstość ośrodka

$\nabla$  - operator Laplace'a

Równanie falowe opisujące ruch falowy dla ośrodka ze stratami jest inne niż dla ciała idealnie sprężystego. Te różnice przenoszą się także na równania, które opisują prędkości fali w ośrodku ze stratami.

Prędkość fali w niejednorodnym ośrodku ziarnistym oprócz tego że jest stałą materiałową i jest związana z jego cechami fizycznymi - gęstością, sprężystością opisaną przez stałe  $E, \nu, \mu$ , jest również zależna od takich czynników jak: tłumienie fali przez ośrodek, częstotliwości fali, budowy tego ośrodka itp. Dlatego, w odróżnieniu od propagacji fal w ośrodkach bez strat (idealnie sprężystych), nie jest wartością stałą [1,14].

#### **1.4.2 Tłumienie fali rozchodzącej się w ośrodkach porowatych i ziarnistych**

Na temat tłumienia fal w ośrodkach ziarnistych - skałach poswatało wiele prac. Utwardzona masa formierska ze spoiwami swoja budową makroskopową jest podobna do piaskowca. Propagacja fal ultradźwiękowych w ośrodku ziarnistym jakim jest piaskowiec jest dobrze poznana [15,18].

Cechami charakterystycznymi ośrodków ziarnistych takich jak skały, czy część mas formierskich są [14]:

- różne wymiary i właściwości elementów składowych - ziaren osnowy
- różne modele (układy) rozmieszczenia i łączenia ze sobą poszczególnych ziaren - mogą stykać się bezpośrednio, lub być łączone spoiwem o innych właściwościach. Dla mas wiązanych chemicznie spoiwo, przechodząc ze stanu płynnego w stały, zmienia swoje właściwości.

Dla ośrodków ziarnistych tłumienie fali sprężystej zależne jest od wielu procesów mechanicznych i termicznych wywołanych przez samą falę. Możemy wyróżnić trzy główne przyczyny strat energii i tłumienia fali [14,18]:

- wewnętrzne tarcia w ośrodku  $\delta_r$
- zjawiska termiczne  $\delta_T$
- rozproszenie Rayleigha  $\delta_R$

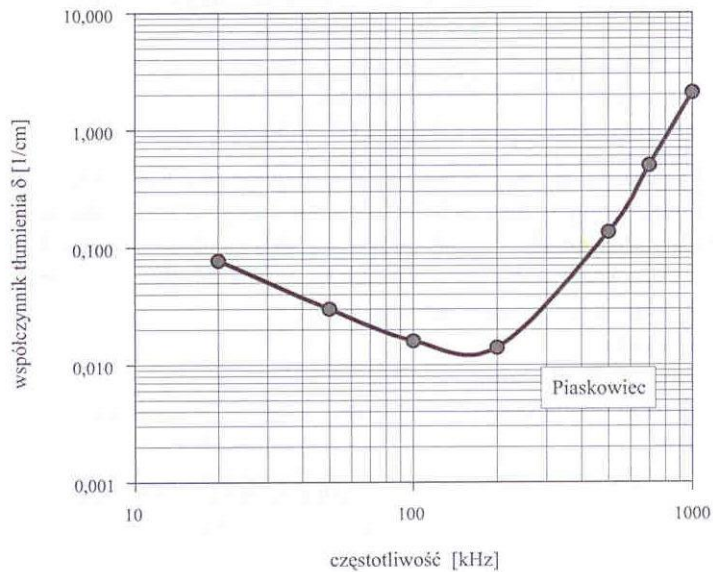
Udział, każdego z trzech wymienionych wyżej czynników, w procesie tłumienia fali ultradźwiękowej w jednorodnym ośrodku ziarnistym uzależniony jest od częstotliwości i struktury ośrodka, którego cechami są [14,18]:

- wymiary ziarna osnowy,
- właściwości termiczne składników,
- właściwości sprężyste składników,
- gęstość składników.

Sumaryczne tłumienie fali oblicza się według wzoru:

$$\delta = \delta_r + \delta_T + \delta_R \quad (8)$$

Rysunek 1 przedstawia wyniki sumarycznego tłumienia piaskowców, wyznaczone za pomocą obliczeń i pomiarów.



Rys. 1 Sumaryczny współczynnik tłumienia fal ultradźwiękowych w piaskowcu w funkcji częstotliwości [14,18]

W zakresie częstotliwości 100 - 200 kHz osiąga się najmniejsze tłumienie. W badaniach materiałów o ziarnistej budowie wykorzystuje się te częstotliwości. Ze względu na strukturę, która stwarza dogodne możliwości do powstawania silnych tarć pomiędzy ziarnami kwarcu a spoiwem - co może wywoływać rozpraszanie fali na ich stykach, w piaskowcu zachodzą największe straty relaksacyjne [16,18].

W ośrodkach ziarnistych, cechujących się dużym współczynnikiem tłumienia fali, prędkość fali zależy od wielu czynników. W równaniu 9 na prędkość fali w ośrodkach nieliniowo-sprężystych mają wpływ dwa czynniki - wielkość tłumienia i częstotliwość fali [14,16]:

$$c = c_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2} \quad (9)$$

gdzie:

$c_0$  - prędkość fali w ośrodku liniowo-sprężystym,

$\delta$  - sumaryczny współczynnik tłumienia,

$\omega$  - częstotliwość kołowa fali.

Prędkość rozchodzenia się fali w materiałach uziarnionych zmienia się w szerokim zakresie i podlega wahaniom w zależności od rodzaju i rozmieszczenia



składników. Dzieje się tak dlatego, że poszczególne składniki materiałów uziarnionych mają różne wartości stałych sprężystości -  $E$  i  $\nu$ . W związku z tym możemy jedynie mówić o pewnej prędkości średniej, która wynika z procentowego udziału prędkości w poszczególnych składnikach [14,18].

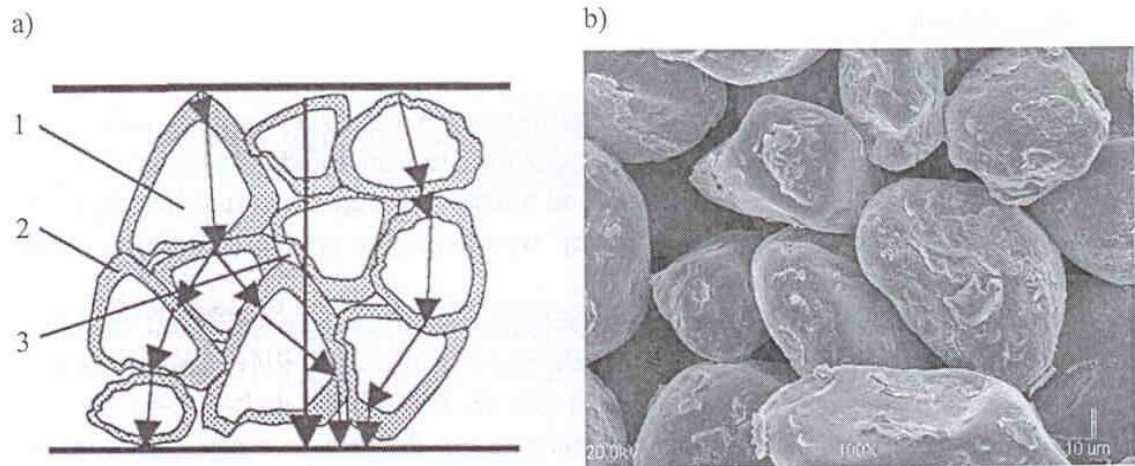
Masy formierskie należą do materiałów nieliniowo sprężystych. Pewne cechy tych ciał zależą od stopnia zagęszczenia lub utwardzenia masy. Masy formierskie ze spoiwami nabierają cech ciała sprężystego w trakcie utwardzania się spoiwa łączącego ziarna. Prędkość propagacji fali a także tłumienie zależy od częstotliwości fali i będzie podlegać wahaniom [14].

### **1.5 Propagacja fali sprężystej - modele reologiczne masy formierskiej**

W trakcie procesu technologicznego masy formierskie zmieniają swoje cechy sprężyste. Na początku, po sporządzeniu są one najczęściej tworzywami lepko-sprężystymi - np. masy z płynnymi spoiwami chemicznymi. Podczas utwardzania, właściwości reologiczne mas ulegają zmianie i stają się najpierw tworzywami sprężysto-plastycznymi - z zanikającą plastycznością, by w końcu stać się tworzywami nieliniowo-sprężystymi.

Powodem osłabienia fali sprężystej w ośrodku uziarnionym są zjawiska absorpcji i rozproszenia. Relaksacja, lepkość, przewodnictwo i promieniowanie ciepła są przyczyną absorpcji, natomiast niejednorodność ośrodka i granice faz są przyczyną rozproszenia fali. Obydwa czynniki - absorpcja i rozproszenie - wpływają na mierzony w ośrodku współczynnik tłumienia, lub prędkość fali. Udział poszczególnego czynnika jest trudny do zmierzenia, ale od strony teoretycznej mogą być opisane oddzielnie [19,20].

Rysunek 2 przedstawia schemat struktury zagęszczonej masy formierskiej.



Rys. 2 Model (a) i wygląd (b) zagęszczonej masy formierskiej: 1 - ziarna osnowy, 2 - warstwa spoiwa, 3 - przestrzeń wypełniona gazem - mieszanina powietrza, pary wodnej, produktów reakcji [14]

W opisywanym cieple, z punktu reologicznego, możemy wydzielić trzy rodzaje składników [14]:

- ziarna osnowy - posiada wysoką i niezmienną w czasie sprężystość.
- spoiwo chemiczne - podczas sporządzania posiada małą sprężystość, dużą plastyczność, po związaniu ma wielokrotnie wyższą sprężystość niż na początku.
- gazy - wypełniają przestrzenie między ziarnowe, nie nadają cech sprężystych masie, ale mogą uczestniczyć w propagacji fali

Masa formierska jest wielofazowym komponentem o cechach lepko-sprężystych. Podczas wiązania właściwości sprężyste masy podlegają ciągłym zmianom. Podczas utwardzania lepkość spoiwa się zwiększa. W końcowej fazie procesu utwardzania spoiwo przechodzi w stan stały.

Dla mas ze spoiwami chemicznymi podczas utwardzania szybkość, z jaką zachodzą zmiany właściwości reologicznych masy, nie jest stała i jest związana z kinetyką chemicznej reakcji spoiwo - utwardzacz. Przebieg takiej reakcji jest zależny od chwilowych stężeń reagentów, ale także od zdolności masy do odprowadzenia powstałych w trakcie reakcji produktów gazowych. W wyniku tych procesów zdolność masy do przenoszenia dynamicznych odkształceń wywołanych działaniem sił zewnętrznych ciągle się zmienia. Odkształcenia mogą przyjmować postać fali sprężystej, której przemieszczanie opisują równania ruchu falowego [14].

W masie formierskiej wektor odkształceń - ruch wymuszony - przebiega przez napotkane ośrodki, czyli ziarna osnowy, warstwy spoiwa i gazy w przestrzeniach między ziarnowych. Odkształcenia sprężyste ośrodka są przekazywane pomiędzy ziarnami osnowy przez powierzchnie styków, po drodze ulegając osłabieniu, gdyż każdy składnik masy jest ośrodkiem tłumiącym. Sumaryczne osłabienie fali proporcjonalne jest do właściwości tłumiących poszczególnych składników masy i ich udziału objętościowego. Osnowa wpływa na drogę fali poprzez kształt i wielkość ziaren i decyduje o ilości granic ziarno - spoiwo. Natomiast spoiwo, jego ilość i rodzaj decyduje o sumarycznej grubości warstw na drodze pojedynczej fali [14].

Gazy, których objętość jest równa objętości porów między ziarnowych, mogą przenosić fale dźwiękową, gdy nie ma pomiędzy ziarnami osnowy kontaktów sprężystych lub sprężysto-lepkich (np. luźno nasypiana masa).

Składniki masy formierskiej - ośrodka porowatego - możemy podzielić na [14]:

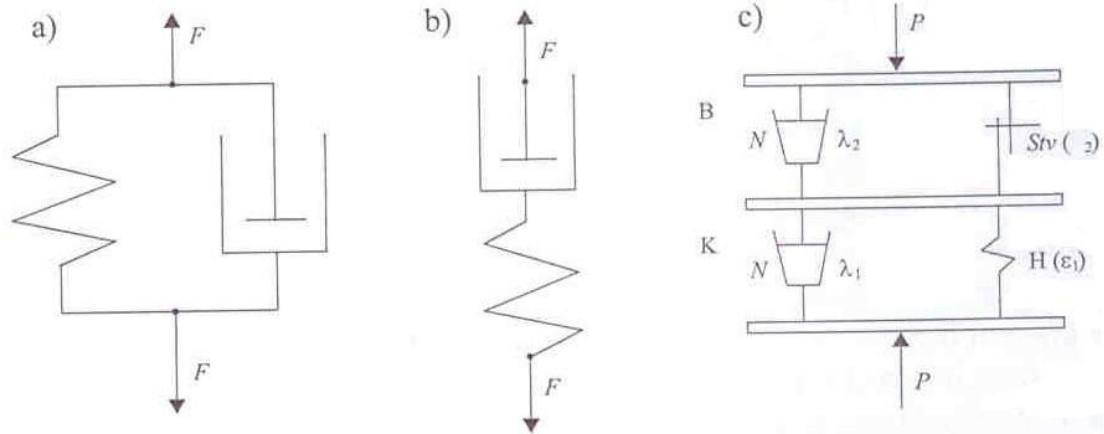
- sprężyste
- lepkie

Ośrodek jakim jest masa ze spoiwem chemicznym można określić jako ośrodek ziarnisty o cechach tworzywa lepko-sprężystego - przy czym właściwości lepko-sprężyste, podczas procesu utwardzania ulegają ciągłym zmianom. Właściwości takiego ośrodka można rozpatrywać jedynie w ujęciu makro.

Równania reologiczne ciał budowane są na bazie modułów odpowiadających ośrodkom [21,22]:

- sprężystemu - ciało Hooke'a
- lepkiemu - ciało Newtona
- plastyczne płynięcie - ciało Saint Venanta

Dla ośrodka jakim jest masa formierska ze spoiwami chemicznymi, do opisu właściwości reologicznych należy się posłużyć się złożonym modelem mechanicznym, który powinien umożliwić interpretacje zarówno pełzania jak i relaksacji sztywnego szkieletu masy [14]. Czasami modele są bardziej złożone i uwzględniają plastyczne odkształcenia ośrodka. Na rysunku 3 przedstawiono modele reologiczne do opisu masy formierskiej.



Rys. 3 Modele reologiczne ciał lepko-sprężystych stosowane do opisu mas formierskich : a) model Kelvina-Voigta, b) model Maxwella, c) model złożony [14]

Przekształcając równania opisujące modele reologiczne ciała lepko-sprężystych wyznaczmy prędkość falową i współczynnik tłumienia [1,14]:

$$c_L = \left( \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \right) * \sqrt{\frac{2 * (1 + \omega^2 * r^2) * (\sqrt{1 + \omega^2 * r^2} - 1)}{\omega^2 * r^2}} \quad (10)$$

$$\alpha_\eta = \omega * \left( \sqrt{\frac{\rho_0}{K}} \right) * \sqrt{\frac{(\sqrt{1 + \omega^2 * r^2} - 1)}{2(1 + \omega^2 * r^2)}} \quad (11)$$

gdzie  $r = \frac{\eta}{K} = \frac{\eta}{\beta_{ad}} = \eta * \beta_{ad}$

Prędkość fali ultradźwiękowej w ośrodku lepko-sprężystym zależy od cech materiałowych ośrodka i od częstotliwości fali. Zgodnie z równaniem 10, gdy zwiększeniu ulegnie częstotliwość, zwiększy się również prędkość fali. Podwyższanie lepkości ośrodka będzie powodować zwiększanie się prędkości fali. Wzrostem częstotliwości powoduje również wzrost współczynnika tłumienia.

Cechy reologiczne mas, w trakcie procesu utwardzania, zmieniają się w szerokim zakresie. Po sporządzeniu masy ma ona dużą płynność, dzięki temu, że spoiwo ma stosunkowo małą lepkość. W przypadku, gdy siły lepkości w stosunku do sił sprężystości są małe ( $\omega * r \ll 1$ ) równania 10; 11 upraszczają się [1,14]:

$$c_L \approx \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (12)$$

$$\alpha_{\eta} = \frac{\omega^2}{2 \cdot \rho_0 \cdot c^3} * \eta \quad (13)$$

Pomiędzy dynamicznym modułem sprężystości wzdłużnej  $E_d$  a objętościowym modułem sprężystości - ściśliwości  $K$  zachodzi relacja [1,14]:

$$K = \sqrt{\frac{E_d}{3(1-2\nu)}} \quad (14)$$

gdzie:

$\nu$  - dynamiczny współczynnik Poissona.

Po utwardzeniu spoiwo przechodzi w stan stały, co praktycznie oznacza osiągnięcie bardzo dużej wartości lepkości spoiwa ( $\omega * r \gg 1$ ), wtedy równania 10; 11 przyjmują postać [1,14]:

$$c = \sqrt{\frac{2\omega\eta}{\rho_0}} \quad (15)$$

$$\alpha_{\eta} = \sqrt{\frac{\omega * \rho_0}{2 * \eta}} \quad (16)$$

Analizując uproszczone równania propagacji fal w ośrodku lepko-sprężystym, za jaki uważa się masy ze spoiwami chemicznymi, możemy zauważyć, że procesy fizykochemiczne zachodzące w spoiwach powodują zmiany tłumienia fali i jej prędkości.

W danych warunkach technologicznych, zmiany prędkości fali w trakcie procesów zachodzących podczas utwardzania masy ze spoiwami, mogą być użyte do kontroli szybkości, z jaką te zjawiska przebiegają.

## 1.6 Zastosowanie fal ultradźwiękowych w odlewnictwie

W odlewnictwie od wielu lat fale ultradźwiękowe są stosowane w badaniach nieniszczących, głównie w defektoskopii ultradźwiękowej. Defektoskopia ma na celu wykrycia wad powierzchni, ale także wewnętrznych wad materiału (rys, pęcherzy,

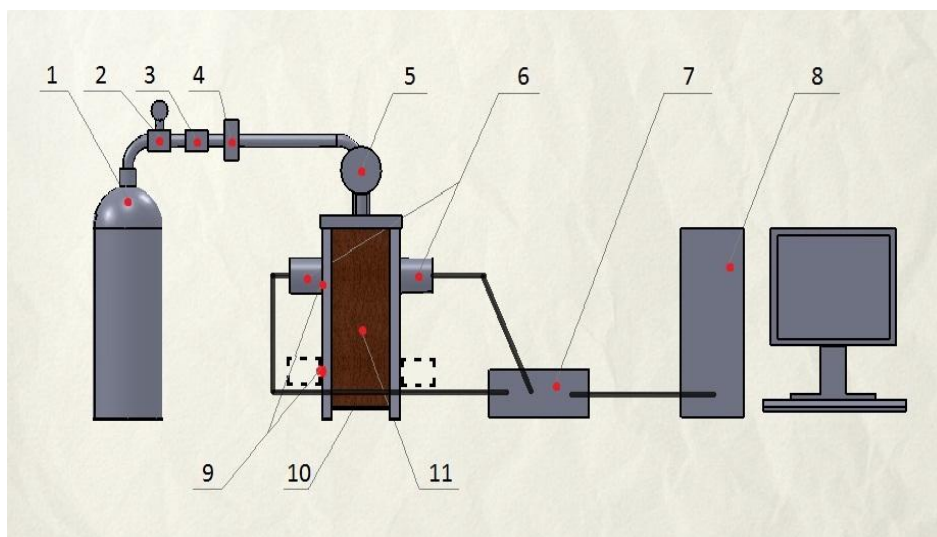
rzadziżn, wtrąceń, pęknięć i inne). Fale ultradźwiękowe są również wykorzystywane w [23] :

- pomiarach grubości obiektów
- mikrodefektoskopii materiałów
- mikroskopii ultradźwiękowej
- badaniu właściwości materiałów - strukturoskopii
- badaniu stanu materiału - pomiary naprężeń

Przykładem wykorzystania ultradźwięków w odlewnictwie może być użycie ich do: badań odlewów ciśnieniowych, obróbki w stanie ciekłym ultradźwiękami mieszanek gipsowych dla odlewnictwa, kontroli jakości, czy wykorzystanie w badaniach i ocenie zmęczenia cieplnego części żeliwnych [23].

W ostatnich 20 latach pojawiły się nowe propozycje wykorzystania fal ultradźwiękowych w odlewnictwie, tym razem badania dotyczą mas odlewniczych. Mikulczyński i Samsonowicz w swoich pracach przedstawiają użycie techniki ultradźwiękowej do oceny właściwości wytrzymałościowych klasycznych mas formierskich, pomiaru wilgotności czy przepuszczalności. Ponadto Mikulczyński prezentuje sposoby oznaczania lepiscza aktywnego w masach, czy modułu sprężystości. Kollek i zespół prezentuje zastosowanie metody ultradźwiękowej do oceny parametrów modelu reologicznego mas formierskich. Z kolei Zych [24-27] przedstawia sposób pomiaru wilgotności mas formierskich, oceny gęstości pozornej wilgotnych mas formierskich, badanie wierzchniej warstwy form piaskowych czy badanie strefy przewilżonej - kinetyki jej tworzenia.

W 2006 roku Zych [28] opatentował metodę badań procesu utwardzani przy użyciu techniki ultradźwiękowej, co stworzyło nowe jakościowo możliwości badawcze w monitorowaniu procesów wiązania mas formierskich (Patent PL 192202 B1). Rys. 4 pokazuje schemat stanowiska do badań kinetyki utwardzania mas ze spoiwami chemicznymi.



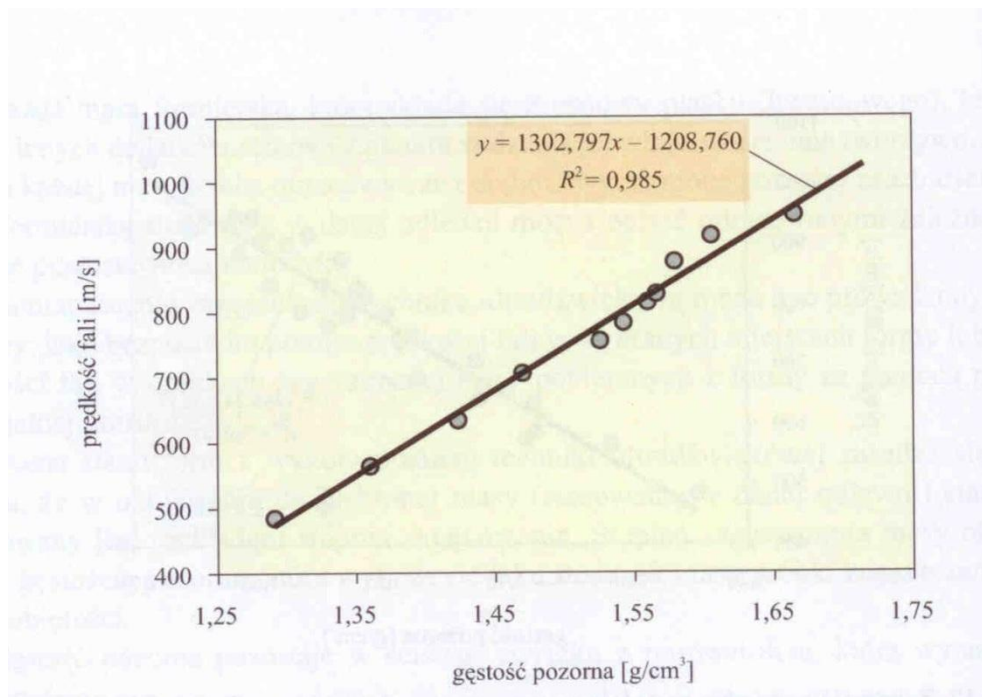
Rys. 4 Stanowisko do badań ultradźwiękowych kinetyki utwardzania mas ze spoiwami chemicznymi (1-butla z gazem, 2-4 reduktor z podgrzewaczem i sterowaniem, 5 pomiar dozowania, 6 głowice ultradźwiękowe, 7 tester, 8 PC, 9 miejsca pomiarowe, 10-11 rdzennica - forma)

W innych pracach Zych [29-33] prezentuje użycie techniki ultradźwiękowej do monitorowania procesu utwardzania mas formierskich ze spoiwami chemicznymi przez badanie kinetyki utwardzania, czy badanie wiązania i twardnienia tworzyw ze spoiwami cementowymi. W najnowszych pracach Zych i Jamrozowicz [34,35] pokazują wykorzystanie techniki ultradźwiękowej do pomiaru przemieszczania się frontu utwardzania mas formierskich utwardzanych gazami.

## 2. Badania ultradźwiękowe mas formierskich.

Istota proponowanej metody ultradźwiękowych badań mas formierskich sprowadza się do prowadzenia pomiarów prędkości fali ultradźwiękowej w próbce masy, w której wcześniej określono przepuszczalność lub (po pomiarze ultradźwiękowym) wytrzymałość (np.  $R_c^w$ ).

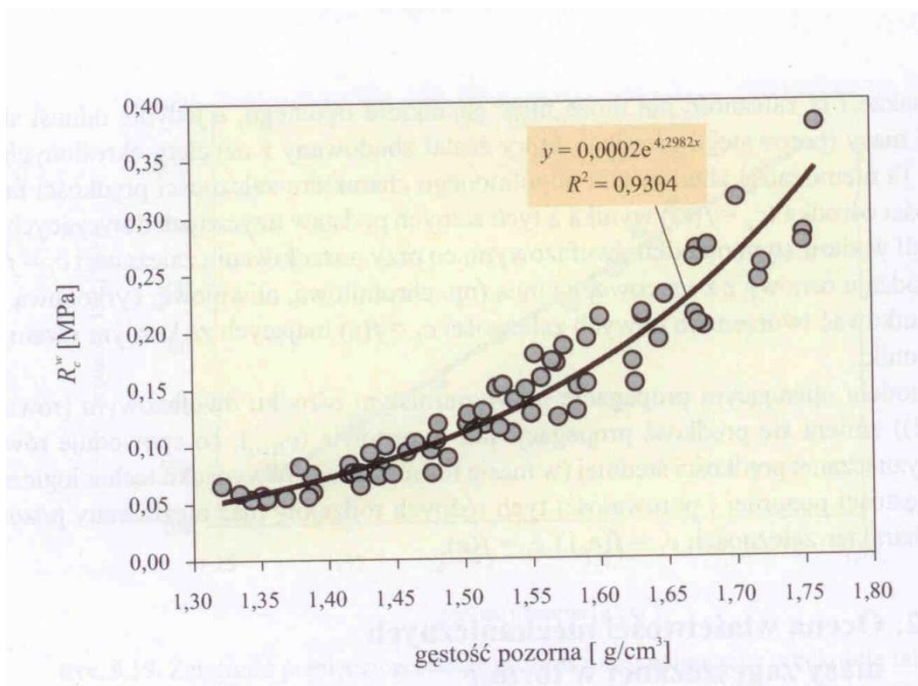
Na rys. 5 przedstawiono zależność pomiędzy gęstością pozorną masy wilgotnej a prędkością fali.



Rys. 4 Zależność pomiędzy gęstością pozorną masy wilgotnej a prędkością fali [14].

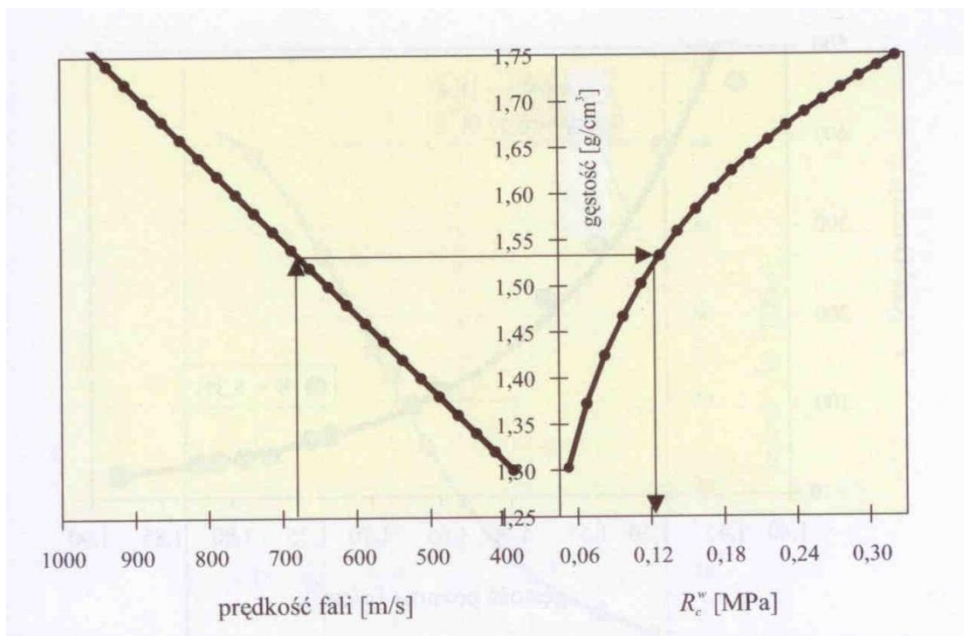
Podstawową właściwością mechaniczną, którą wyznacza się w odniesieniu do wilgotnych mas klasycznych, jest wytrzymałość na ściskanie w stanie wilgotnym  $R_c^w$ . Wytrzymałość dowolnej masy jest funkcją jej składu, sposobu przygotowania i stopnia zagęszczenia, czyli związanego z nim stopnia porowatości. W przypadku każdej wilgotnej masy można wyznaczyć zależność  $R_c^w = f(\rho_o)$ . Na rys. 6 przedstawiono przykład dla takiej zależności.





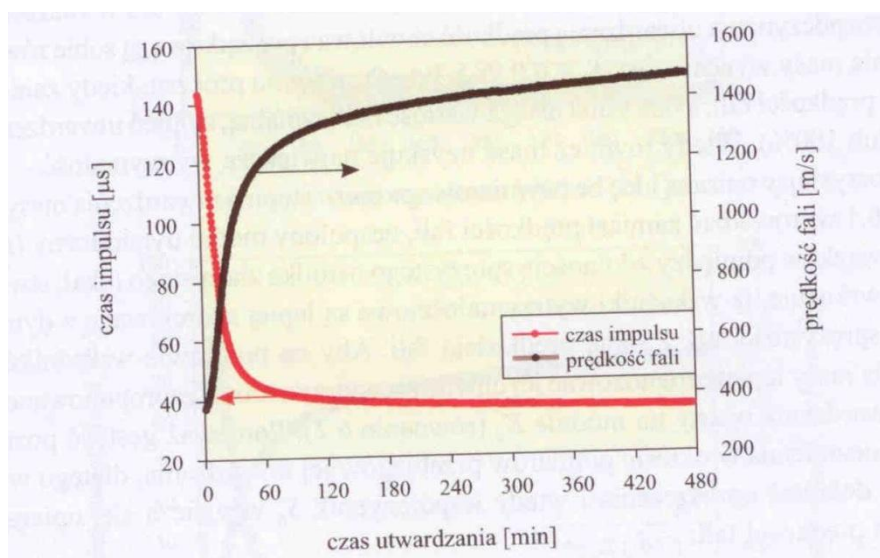
Rys. 6 Wpływ gęstości pozornej wilgotnej masy na jej wytrzymałość na ściskanie [14].

Ponieważ, jak wykazano wcześniej, pomiędzy prędkością fali a gęstością pozorną zachodzi zależność liniowa, dlatego łatwo jest wyznaczyć zależność pomiędzy propagacją fali w wybranej masie a jej wytrzymałością – rys.7



Rys. 7 Zależność pomiędzy prędkością propagacji fal, gęstością pozorną a wytrzymałością na ściskanie [14].

W trakcie wiązania masy ze spoiwem określany jest czas przejścia impulsu ultradźwiękowego przez próbkę masy znajdującej się w próbniku. Znając odległość między głowicami pomiarowymi – grubość próbki – można wyznaczyć prędkość fali. Prędkość fali w trakcie procesu utwardzania – wiązania – masy zmienia się zazwyczaj od 300 do 3000 m/s. przykład przebiegu zmian prędkości fali w próbce przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8 Przebieg zmian przejścia impulsu ultradźwiękowego przez próbkę masy [14].

Do oceny stanu utwardzenia masy opracowano wskaźnik zwany stopniem utwardzenia  $S_x$ . Ma on aspekt również technologiczny, ponieważ określa, w której fazie w danej chwili jest proces wiązania masy. Współczynnik  $S_x$  oparty jest na bezwymiarowej prędkości fali i został zdefiniowany zależnością 17:

$$S_x = \frac{c_{L(x)} - c_{L(0)}}{c_{L(\max)} - c_{L(0)}} \quad (17)$$

Gdzie:

$S_x$  – prędkościowy stopień utwardzenia masy

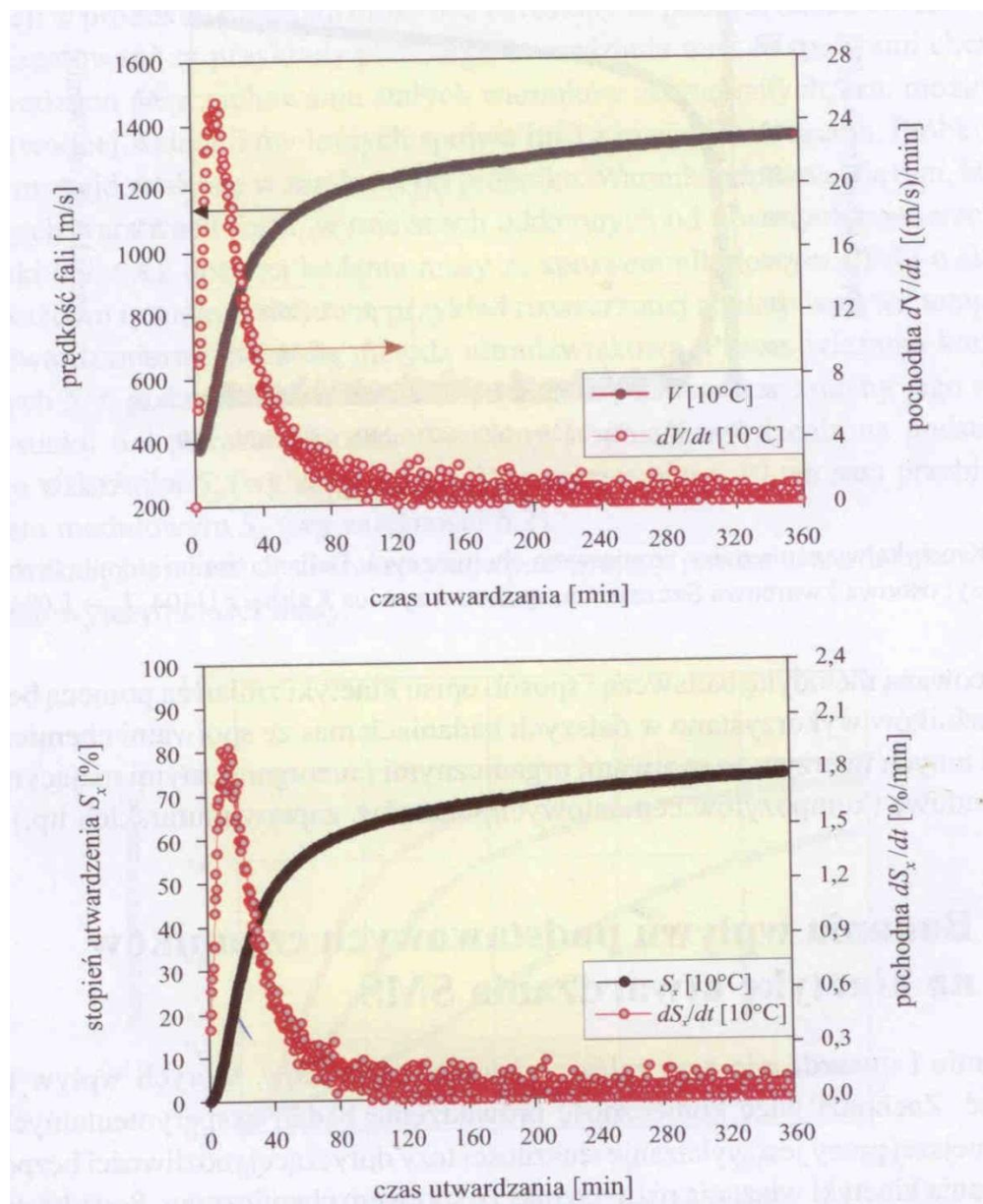
$c_{L(x)}$  – prędkość fali w próbce określona w danej chwili

$c_{L(0)}$  – prędkość fali w próbce w chwili początkowej ( $t=0$ )

$c_{L(\max)}$  – prędkość fali w próbce masy po całkowitym utwardzeniu

Tak zdefiniowany wskaźnik  $S_x$  mieści się w przedziale 0 – 1 lub w zakresie 0 – 100 %.

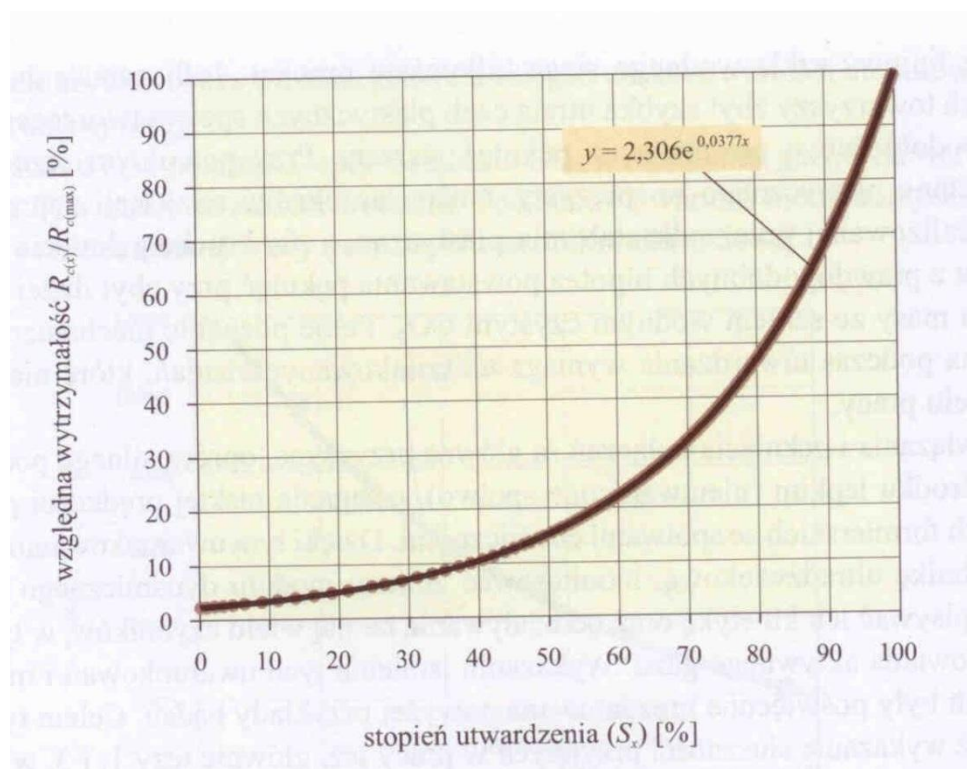
Proces utwardzania masy, podobnie jak wiele reakcji chemicznych, przebiega ze zmienną szybkością w poszczególnych jego fazach. Na ogół po wstępnym okresie inkubacji obserwuje się wyraźny przyrost prędkości procesu, która osiąga w pewnej chwili maksimum. Od tej chwili obserwuje się ciągły spadek szybkości. W prowadzonych badaniach ultradźwiękowych szybkość procesu utwardzania można obserwować, analizując wartości: pochodnej prędkości fali w funkcji czasu ( $dc_{L(x)}/dt$ ) albo pochodnej stopnia utwardzenia ( $ds_x/dt$ ). Na rys. 9 pokazano przykładowe przebiegi zmian prędkości fali, stopnia utwardzenia a także ich pochodnych.



Rys. 9 Przebieg zmian szybkości wiązania masy ze spoiwem chemicznym. Badania zmian prędkości fali i stopnia utwardzenia [14].

Wartość pochodnych zawierają informację o szybkości procesu w danej chwili. Moment, do którego prędkość utwardzania zwiększa swoje wartości, czyli okres przydatności masy do formowania zwany jest inaczej wskaźnikiem jej żywotności. Formy (próbki) wykonane po tym okresie wiązania mają zdecydowanie niższe wskaźniki wytrzymałościowe.

Stopień utwardzenia zdefiniowany zależnością 17, opartą na pomiarach propagacji fali, pozostaje w ścisłym związku z wytrzymałością masy, niezależnie od tego w jaki sposób jest ona utwardzana. Związek ten wynika z faktu, iż zarówno prędkość fali, jak i wytrzymałość masy zależą od jej modułu sprężystości, który w momencie wiązania masy zwiększa się nieprzerwanie aż do pełnego utwardzenia. Wtedy każdy rodzaj wytrzymałości masy osiąga maksymalną wartość. Stosunek wytrzymałości chwilowej do wytrzymałości maksymalnej na końcu procesu utwardzania masy  $R_{c(x)}/R_{c(max)}$  zmienia swoją wartość od 0 do 1 lub od 0 do 100 %. W tym samym okresie stopień utwardzenia masy zmienia się również w zakresie od 0 do 1 (0-100%). Na rys. 10 przedstawiono zależność między stopnie utwardzenia a wytrzymałością masy.



Rys. 10 przykładowy wpływ stopnia utwardzenia masy na z żywicą na jej względną wytrzymałość [14].

Z opracowanej zależności wynika, że w pierwszym okresie utwardzania, w którym szybkość reakcji chemicznych pomiędzy spoiwem a utwardzaczem jest stosunkowo duża, towarzyszy niewielki przyrost wytrzymałości. Rośnie ona szybciej dopiero w końcowej fazie procesu utwardzania, wtedy niewielkie zmiany prędkości fali (stopnia utwardzenia) oznaczają znaczące przyrosty wytrzymałości. Często produktem „ubocznym” reakcji polimeryzacji (czy polikondensacji) żywicy lub innego spoiwa jest woda, która utrudnia przechodzenie produktów reakcji z postaci plastyczno-sprężystej do postaci sprężystej. Dopiero jej usunięcie z masy prowadzi do utwardzenia masy. Warunki zewnętrzne, rodzaj masy (jej przepuszczalność), powierzchnia wymiany (parowanie) próbki – wyraźnie wpływają na kinetykę twardnienia spoiwa i mają duży wpływ (oprócz temperatury) na wynikową szybkość procesu utwardzania. Końcowa faza utwardzania często związana jest z usuwaniem wilgoci z przestrzeni międzyziarnowej masy. Jej obecność, szczególnie przy stosowaniu mas ze spoiwami hydrofilowymi, uplastycznia mostki spoiwa i utrudnia osiągnięcie przez nie wysokiej sprężystości i wytrzymałości.

### **3. Przebieg ćwiczenia.**

W trakcie ćwiczeń zostanie dokonany pomiar przebiegu procesu utwardzania masy wiązanej chemicznie na stanowisku do badań ultradźwiękowych. Badaniu zostaną poddane dwie masy. Jedną będzie sypka masa samoutwardzalna ze spoiwem organicznym a drugą sypka masa szybkooutwardzalna – utwardzana czynnikiem gazowym.

Rodzaj masy a także sposób jej przygotowania zostanie podany w trakcie ćwiczeń przez prowadzącego.

#### Literatura

- [1] Śliwiński A.: "Ultradźwięki i ich zastosowania", Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 2001
- [2] Lewińska-Romicka A.: "Badania nieniszczące - podstawy defektoskopii", Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 2001
- [3] Biot M.A.: "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid", J. Acoust. Soc. Am. 28: 168-191, 1955
- [4] Biot A.M.: "Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media", J. Appl. Phys. 33: 1482-1498, 1962

- [5] Plona T.J.: "Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies", *Appl. Phys. Lett.* 36: 259-261, 1980
- [6] Berryman J.G.: "Confirmation of Biot's theory", *Appl. Phys. Lett.* 37: 4, 1980
- [7] Soczkiewicz E., Chivers R.C.: "Propagation and scattering of acoustic waves in a turbulent medium", *Journal of Sound and Vibration* 241(2): 197-205, 2001
- [8] Soczkiewicz E., Chivers R.C.: "Propagation of acoustic waves in random media, a comparison of methods and results", *Ultrasonics International 87 Conference Proceedings, London, Butterworth, Heinemann* 543-548, 1987
- [9] Soczkiewicz E.: "Application of quantum field theory methods in studies of ultrasonic wave propagation in random media", *Ultrasonic methods in the Evaluation of Inhomogeneous Materials* 163-173, 1987
- [10] Edelman I.: "on the existence of the low-frequency surface waves in a porous medium", *C.R. Mecanique* 332: 43-49, 2004
- [11] Edelman I.: "Bifurcation of the biot slow wave in a porous medium", *J. Acoust. Soc. Am.* 114(1): 90-97, 2002
- [12] Boutin C., Royer P., Auriault J.L.: "Acoustic absorption of porous surfacing with dual porosity", *Int. J. Solids Structures* 35(34-35): 4709-4737, 1998
- [13] Mozhaev V.G., Weihnacht M.: "Subsonic leaky Rayleigh waves at liquid-solid interfaces", *Ultrasonics* 40: 927-933, 2002
- [14] Zych J.S.: "Synteza zastosowań techniki ultradźwiękowej w analizie kinetyki wybranych procesów zachodzących w tworzywach formierskich", AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne. Seria: Rozprawy i Monografie nr 163, Kraków 2007
- [15] Obraz J.: "Ultradźwięki w technice pomiarowej", WNT Warszawa 1983
- [16] Chrzan T.: "Ultradźwiękowe badania właściwości skał i materiałów budowlanych", *Prace naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*, 72 Monografie, 35, Wrocław
- [17] Deputat J.: "Badania ultradźwiękowe", Wydawnictwo IMŻ, Gliwice 1979
- [18] Kołtoński W.: "Propagacja fal ultradźwiękowych w skałach i jej praktyczne zastosowanie", PWN Warszawa 1960
- [19] Pawłowski Z.: "Ocena wytrzymałości materiałów kruchych metodą ultradźwiękową", *Prace IPPT* 13, Warszawa 1968
- [20] Neville A.M.: "Właściwości betonu", *Polski Cement*, Kraków 2000
- [21] Kembłowski Z. "Reometria płynów nienewtonowskich", WNT Warszawa 1973
- [22] Laube T., Whitman R.V.: "Mechanika gruntów" Arkady Warszawa 1977
- [23] Jamrozowicz Ł.: „Zastosowanie techniki ultradźwiękowej do monitorowania procesów zachodzących przy wykonywaniu rdzeni z mas szybkowiązujących” Praca doktorska AGH 2011 rok, Kraków.
- [24] Zych J.: "Ultradźwiękowa metoda oceny stanu form wykonywanych z wilgotnych mas klasycznych", *Przegląd Odlewnictwa* 3: 97-100, 2000
- [25] Zych J.: "Bestimmung der scheinbaren Dichte von Naßformsanden mit Ultraschallverfahren", *Gisserei Rundschau* 46(9-10): 14-19, 1999
- [26] Zych J.: "Kompleksowa ocena jakości mas ze spoiwami chemicznymi oparta o nową metodę badań", *Przegląd Odlewnictwa* 56(7-8): 330-337, 2006

- [27] Zych J.: "Strefa przewilżona w masach ze szkłem wodnym - ultradźwiękowe badania kinetyki jej tworzenia", Przegląd Odlewnictwa 53(11-12): 406-414, 2003
- [28] Zych J.: "Sposób badania procesu utwardzania mas formierskich lub rdzeniowych ze spoiwem", Patent Nr 192-202
- [29] Zych J.: "Nowa, ultradźwiękowa metoda monitoringu procesu utwardzania mas formierskich ze spoiwami chemicznymi", Przegląd Odlewnictwa 5: 162-168, 2002
- [30] Zych J.: "Badania, metoda nieniszcząca, procesu wiązania mas szybko utwardzalnych przedmuchiwanych gazami", Archives of Foundry 3(10): 297-306, 2003
- [31] Zych J.: "Ultraschallmethode bei der Verfahrenskontrolle der Bindung chemisch gebundener Formsande", Gießerei Rundschau 47(1-2): 10-14, 2000
- [32] Zych J. "Zastosowanie metody ultradźwiękowej do badania wiązania i twardnienia tworzyw ze spoiwem cementowym", Cement Wapno Beton 1: 5-16, 2006
- [33] Zych J.: "Qualitätskontrolle von Gießformelementen aus chemisch gebundenem Sand mit Ultraschall", Giessereiforschung 55(1): 18-21, 2003
- [34] Zych J., Jamrozowicz Ł.: "Formy i rdzenie z mas szybko wiążących - wyznaczenie prędkości przemieszczania się frontu utwardzania", Archives of Foundry Engineering 10(2): 173-176, 2010
- [35] Zych J., Jamrozowicz Ł.: "Advancement of the hardening front in forms and cores made of quickly bonding composites - ultrasonic analyses", Archives of Metallurgy and Materials 55(3): 963-968, 2010