

**2.22 — akustyczne metody badania  
materiałów i układów  
mechanicznych**

**Krzysztof A. Kunert**

**SZYBKA ULTRADŹWIĘKOWA METODA  
POMIARU WSPÓŁCZYNNIKA  
PRZEWODZENIA CIEPŁA  
W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH**

**34/1990**

P. 269



**WARSZAWA 1990**

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 20 kwietnia 1990 r.



56798



N e p r a w a c h r ę k o p i s u

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Nakład 100 egz. Ark.wyd.0,75 Ark.druk. 1,0  
Oddano do drukarni w listopadzie 1990 r.  
Nr zamówienia 295/90

---

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa  
ul.Śniadeckich 8

Krzysztof A. Kunert

SZYBKA ULTRADŹWIĘKOWA METODA POMIARU  
WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA  
W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH

Streszczenie

W pracy opisano szybką ultradźwiękową metodę pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła w materiałach budowlanych.

Metoda ta opiera się na wykrytej eksperymentalnie liniowej zależności między prędkością fali ultradźwiękowej, a współczynnikiem przewodzenia ciepła. Ponadto spróbowano naświetlić zagadnienie przewodzenia ciepła i propagacji fali ultradźwiękowej w materiałach budowlanych.

Energia drgań cieplnych sieci krystalicznej czy energia fal sprężystych są skwantyzowane a kwant energii sprężystej nazywamy fononem. Rozchodzenie się fal akustycznych polega na propagacji fononów. Także drgania cieplne decydujące o przenoszeniu są termicznie wzbudzonymi fononami. Częstotliwości fal ultradźwiękowych stosowanych w badaniach materiałów są zwykle zawarte w zakresie od 40 kHz do dziesiątków megahertzów i fale te są stosowane w postaci wiązek o jednej częstotliwości. Drgania cieplne mają znacznie wyższe częstotliwości i szerokie zależne od struktury ciepła widmo częstotliwości. Wspólna natura fal ultradźwiękowych i drgań cieplnych sieci wysunęła możliwość wykorzystania pomiarów parametrów opisujących rozchodzenie się wiązki fal ultradźwiękowych do badania własności cieplnych materiałów. Pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych wykorzystano na przykład do wyznaczania temperatury Debye'a w ciałach stałych /1/.

W ostatnich latach dokonano znaczącego postępu w dziedzinie aparatury ultradźwiękowej. Możliwe stały się bardzo dokładne pomiary czasu przejścia fal ultradźwiękowych, a przez to powstała szansa badania zjawisk związanych z niewielkimi nawet zmianami prędkości fal ultradźwiękowych. Przykładami mogą tu być ultradźwiękowe pomiary naprężeń czy efekt kumulacji uszkodzeń w wyniku zmęczenia, które manifestują się zmianami

prędkości fal ultradźwiękowych rzędu pojedynczych metrów na sekundę i dla których śledzenia stosuje się pomiary czasu przejścia fal z dokładnością do jednej nanosekundy /24/

W nowej sytuacji aparaturowej autor postanowił ponownie zbadać możliwość zastosowania techniki ultradźwiękowej do badania własności cieplnych materiałów budowlanych poprzez bezpośrednie pomiary własności cieplnych a nie jak poprzednio to czyniono /1/ po przez skąplikowane oznaczenie z modułu G. Materiały budowlane wybrano ze względów praktycznych, gdyż istniejące metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła są zmuadne i pracochłonne. Istnieje zapotrzebowanie na szybką, nieniszczącą metodę oceny własności cieplnych tych materiałów. Do badań zastosowano różne materiały budowlane, a więc w pierwszym rzędzie beton, ze zwiększającą się ilością styropianu /granulowanego spienionego styrenu/ i także gips podobnie modyfikowany dla stopniowego zmniejszenia gęstości próbek. Poza tym badano beton, drewno liściaste i pianobeton /siporeks/.

Tab.1 Na próbkach z tych materiałów wykonano pomiary prędkości fal ultradźwiękowych i współczynnika przewodzenia ciepła. Pomiary prędkości propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej wykonano metodą przepuszczania przy użyciu aparatu ultradźwiękowego Unipan 541. Stosowano głowice o częstotliwości 40 kHz. Wielkość błędu pomiaru wynosiła 50 m/s. Pomiary współczynnika przewodzenia ciepła wykonano aparacie Bocka. Błąd pomiaru wynosił 5,5 %. Poza tym mierzono gęstość próbek. Na jeden wynik podany w tej pracy składały się trzy pomiary jednej własności na trzech próbkach. Współczynnik przewodzenia  $\lambda$  obliczono z następującej znanej zależności:

$$\lambda = \frac{Q \cdot l}{\Delta(t_g - t_z)} \quad [W/m \cdot K]$$

gdzie:

Q - moc grzejnika

l - grubość próbki

$t_g$  - temperatura gorącej powierzchni próbki

$t_z$  - temperatura zimnej powierzchni próbki

Prędkość podłużnych fal ultradźwiękowych jest związana ze stałymi sprężystości i gęstością masy za pomocą następującego wyrażenia:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1+2\nu)}}$$

gdzie:

- $E$  - dynamiczny moduł sprężystości podłużnej
- $\rho$  - gęstość masy
- $\nu$  - współczynnik Poissona

W pierwszym rzędzie sprawdzono wpływ temperatury na prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w materiałach budowlanych. Wyniki podano w tabeli 2. Jak wynika z tabeli 2, przy różnicy temperatur od  $-10$  do  $40^{\circ}\text{C}$  występuje tylko niewielka różnica prędkości bo około 1-2,5%, co związane jest prawdopodobnie ze zmianą współczynników rozszerzalności badanych próbek lub zmianą stanu skupienia wody. Ciekawą rzeczą wydaje się być porównanie kształtu wykresów 1 i 2. Na jednym przedstawiono zależność gęstości od współczynnika przewodzenia ciepła, a na drugim zależność gęstości od prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej.

Widać, że zależność gęstości od współczynnika przewodzenia ciepła jest w przybliżeniu liniowa /Rys.1/. Podobnie kształtuje się zależność prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych od współczynnika przewodzenia ciepła /Rys.3, Tab.1/. Natomiast zależność między gęstością i prędkością rozchodzenia się fal ultradźwiękowych nie ma charakteru liniowego lecz w przybliżeniu wykładniczy /Rys.2/. Porównanie tych zależności nasuwa przypuszczenie, że o ile jedno i drugie zjawisko opiera się na oddziaływaniu fononów w materiale, z uwagi jednak na różną częstotliwość fali ultradźwiękowej i fononów w strumieniu ciepła, występuje wzbudzenie różnych fononów w tym samym materiale. Bardzo duża częstość drgań fononów cieplnych powoduje prawdopodobnie wzbudzenie w materiale elementów podstawowych struktury krystalicznej, wspólnych dla wszystkich tych materiałów lecz znajdujących się w nich w różnej ilości lub gęstości. Dla przykładu można przytoczyć wiązania węgiel-węgiel C-C lub C-H węgiel-wodór w polimerach. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  od temperatury w przybliżeniu liniowa, zależy od gęstości i prędkości rozchodzenia się fal

ultradźwiękowych. Natomiast prędkość fal ultradźwiękowych nie wykazuje już zależności liniowej od gęstości ponieważ częstość takiej fali jest niska w porównaniu z falą cieplną i wzbudzone fonony obejmują prawdopodobnie całe zespoły specyficznych elementów materiału, które są w większości charakterystyczne dla danego ciała stałego /Rys.3./.

Występuje tutaj znane w polimerach zjawisko zależności oznaczonych własności od częstości oddziaływań dynamicznych /3/. Wydaje się także, że mała dokładność w wyznaczaniu temperatury Debye'a w oparciu o wyznaczony ultradźwiękowo dynamiczny moduł  $G$ , /1/ spowodowana jest tym, że moduł  $G$  jest zależny od iloczynu prędkości fali ultradźwiękowej i gęstości, a jak widać z rys. 2. nie istnieje liniowa zależność między tymi wielkościami.

Stwierdzenia te wymagają jednak dalszych badań weryfikacyjnych tak na materiałach budowlanych jak i innych.

Na rysunku 2 pokazano jeszcze jedno zjawisko, które zauważono podczas badań w próbkach betonu z spienionym granulowanym styrenem. Próbki 1,2,3 Tab.1 wykazują zależność liniową rozpatrywanych parametrów /Rys.1,2,3/. Natomiast próbka Nr 4 swoimi własnościami odbiega od pozostałych.

Jest to jak można przypuszczać związane z konwersją faz w próbce nr 4 w porównaniu do pozostałych próbek tego typu.

W próbkach 1,2,3, fazą ciągłą jest beton o malejącej gęstości natomiast w próbce nr 4, na skutek za dużej ilości piankowego styrenu fazą ciągłą jest już spieniony styren, a nie beton i stąd inne nieproporcjonalne do zawartości betonu własności. Wydaje się także, że dla danej struktury lub danego typu materiału, różnica pomiędzy wartością prędkości fal ultradźwiękowych i wartością współczynnika przewodzenia ciepła, powinna być stała w zakresie ciągłości naturalnie jednej fazy, gdyż jest to stała różnica między dwoma typami fononów w jednym materiale. Jest to naturalnie pewna hipoteza, która powinna być jeszcze dokładnie zweryfikowana.

Dla betonu ze styropianem i gipsu ze styropianem podano tę różnicę poniżej.

1. Dla próbek 1,2,3.

1 - 3,13	cement + piasek + styropian
2 - 3,19	"
3 - 3,14	"

2. Dla próbek 8,9,10.

8 - 1,95	czysty gips
9 - 2,03	gips + styropian
10 - 2,01	"

Na rysunkach 4 i 5 pokazano zależność prędkości ultradźwięków od współczynnika przewodzenia ciepła dla próbek 1,2,3 i 8,9, 10 a więc modyfikowanego betonu i gipsu. Jak z podanych wykresów wynika zależności te są liniowe. Pozwala to sądzić, że opierając się na pomiarach ultradźwiękowych będziemy mogli oznaczać w warunkach polowych w budownictwie współczynnik przewodzenia ciepła, mając uprzednio w warunkach laboratoryjnych oznaczone powyższe zależności dla tych typowych materiałów budowlanych /4/ np. rys. 4 i 5 tym bardziej, że pomiar ultradźwiękowy trwa kilka minut, a nie kilkanaście godzin jak w przypadku innych metod.

Powyzsza szybka i niepracochłonna metoda pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła, może mieć duże znaczenie dla oszczędności energii cieplnej w budownictwie.

Autor pragnie podziękować dr Janowi Jaworskiemu z IPPT PAN, dr inż. K.Wojdydze i dr inż. A. Szadkowskiemu z Politechniki Warszawskiej za pomoc przy pomiarach.

## Bibliografia

- 1 Alers G.A. Use of Sound Velocity Measurements in Determining the Debye temperature of Solids. Physical Acoustics Vol III.
- 2 Deputat J. Ultrasonics Technique. for Measuring Stress in Screw. Proc. 9 World Conference on Nondestructive Testing, Melbourn 1979 Paper.
- 3 Kunert K.A. Struktura i własności sieciowanych chemicznie polietylenu i polipropylenu. Praca habilitacyjna Praca IPPT PAN. /11/1989/.
- 4 Kunert K.A. Patent P-277260.

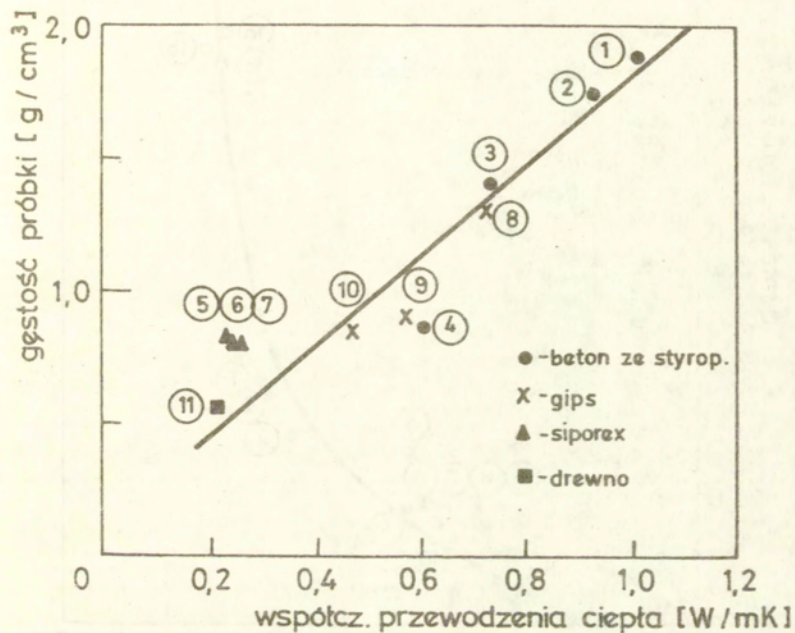


Tabela 1

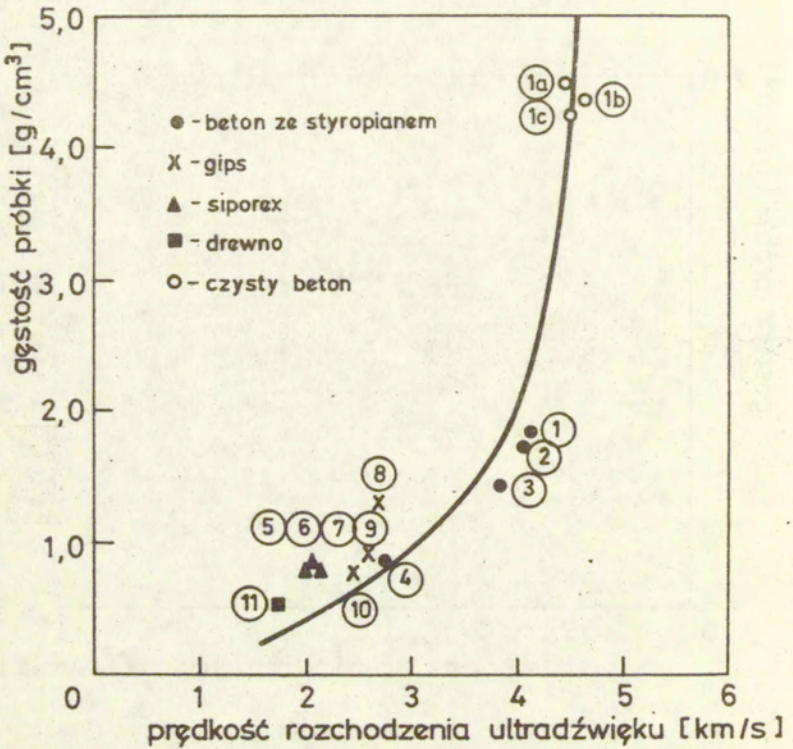
Numer próbki	Wykonanie	Gęstość /cm <sup>3</sup> /	Średnia prędkość ultradźwięków Km/s	Współczynnik przewodzenia ciepła W/mK
1 a	Beton 0,033 m.grub.	5,4	4,34	1,29
1 b	Beton 0,059 m.grub.	5,3	4,24	1,29
1 c	Beton 0,102 m.grub.	5,0	4,30	1,29
1	Cement + piasek 1:2 + styropian 1 dcm <sup>3</sup>	1,89	4,14	1,01
2	Cement + piasek 1:2 + styropian 2 dcm <sup>3</sup>	1,74	4,12	0,93
3	Cement + piasek 1:2 + styropian 3 dcm <sup>3</sup>	1,40	3,88	0,74
4	Cement + piasek 1:2 + styropian 5 dcm <sup>3</sup> próbka wadliwa za dużo styropianu	0,86	2,73	0,61
5	Pianobeton - siporeks	0,80	2,09	0,24
6	Pianobeton-siporeks	0,84	2,11	0,23
7	Pianobeton-siporeks	0,80	2,10	0,25
8	Gips	1,31	2,68	0,73
9	Gips + 1,5 dcm <sup>3</sup> styropianu	0,91	2,61	0,58
10	Gips + 3 dcm <sup>3</sup> styropianu	0,86	2,48	0,47
11	Drewno z drzewa liściastego	0,57	1,68	0,21

Tabela 2

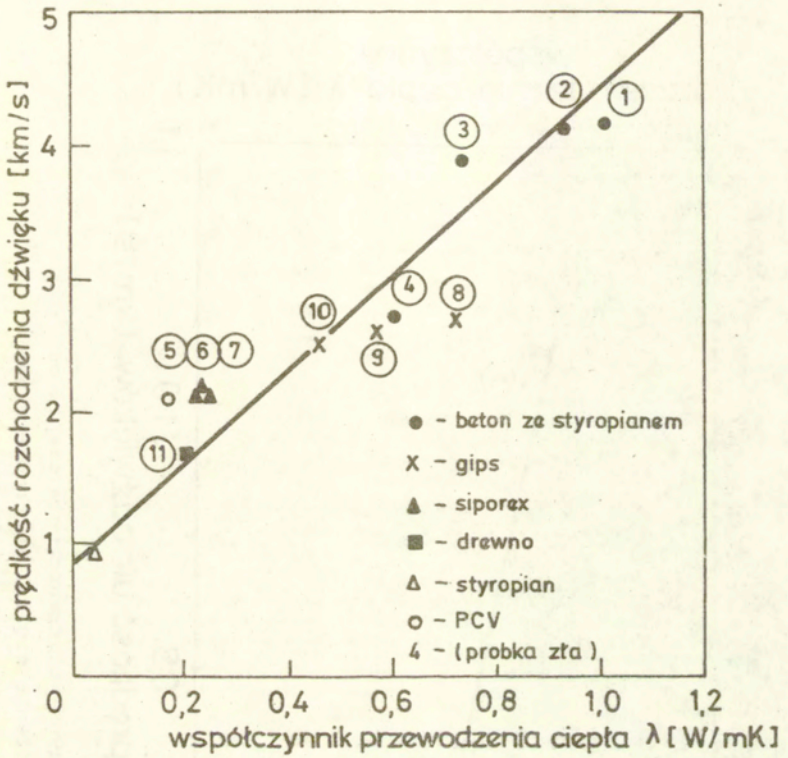
Rodzaj grub. próbki m	-10°C		0°C		10°C		20°C		40°C	
	czas us	pręđ. km/s	czas us	pręđ. km/s	czas us	pręđ. km/s	czas us	pręđ. km/s	czas us	pręđ. km/s
Beton 0,04	9,15	4,37	9,05	4,42	9,20	4,35	9,25	4,32	9,15	4,37
Piano- beton 0,07	24,87	2,81	24,90	2,81	24,95	2,81	25,06	2,79	24,90	2,81
Piano beton 0,05	23,57	2,12	23,50	2,13	23,81	2,10	23,93	2,09	24,08	2,08
Styro- pian 0,04	41,73	0,96	41,83	0,96	41,85	0,96	42,00	0,95	41,63	0,96



Rys. 1. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości badanych próbek materiałów budowlanych.

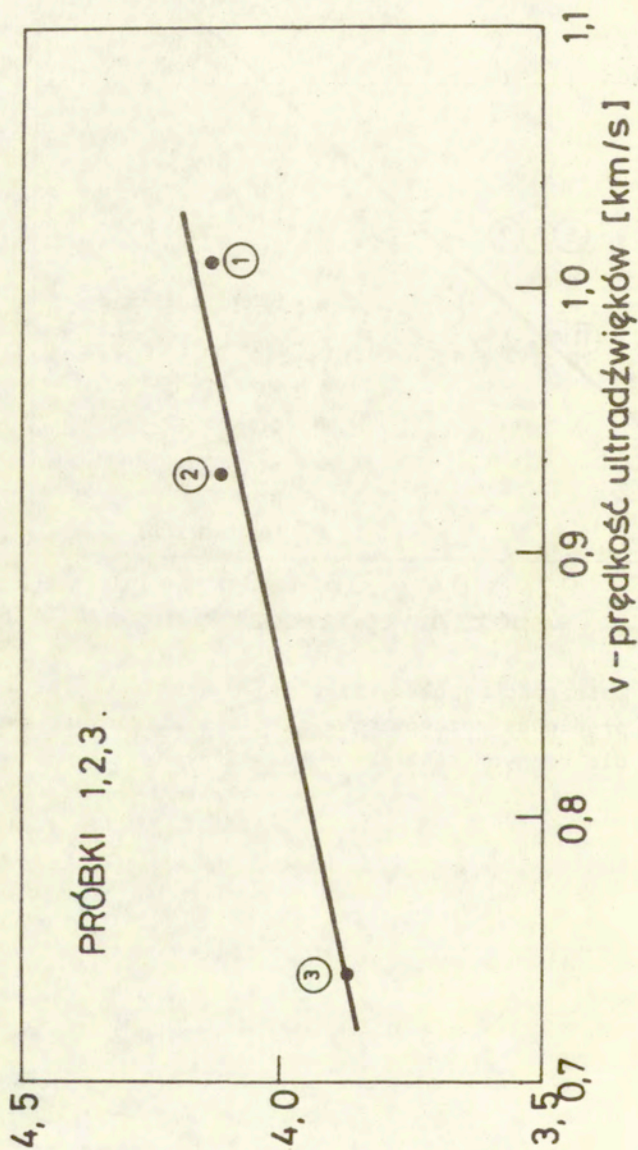


Rys.2. Zależność prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej od gęstości badanych próbek materiałów budowlanych.

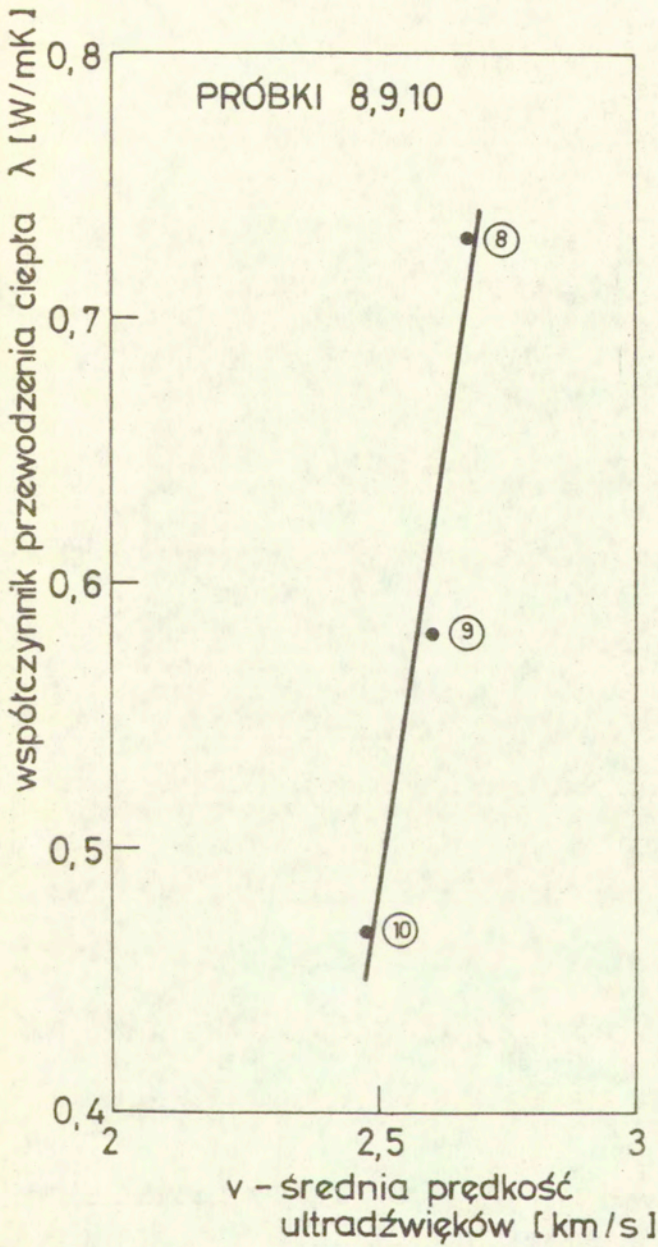


Rys.3. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej dla różnych materiałów budowlanych.

współczynnik  
przewodzenia ciepła  $\lambda$  [W/mK]



Rys.4. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej dla trzech próbek betonu wypełnionego styropianem.



Rys.5. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej dla trzech próbek, gipsu i gipsu z styropianem.