
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 19
(październik–grudzień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

Rok VII

Warszawa–Opole 2014

PIOTR FUDALEJ*
MARZENA NAJDUCHOWSKA**
PAWEŁ PICHNIARCZYK***

Otrzymywanie oraz możliwości zastosowania kruszywa szklano-krystalicznego do wytwarzania materiałów pochłaniających dźwięk

Słowa kluczowe: kruszywo szklano-krystaliczne, perlit, materiały pochłaniające dźwięk, ekrany akustyczne, elementy pochłaniające dźwięk.

Rozwój przemysłu materiałów budowlanych wymaga poszukiwania nowych, tańszych materiałów i surowców, o lepszych właściwościach niż tradycyjnie stosowane. Jednym z surowców, na bazie którego możliwe jest uzyskanie nowych materiałów, mogących mieć szerokie zastosowanie w branży materiałów budowlanych, jest perlit. Podczas procesu jego ekspansji, obok ściśle określonych frakcji perlitu ekspandowanego, powstaje również znaczna ilość pyłu perlitowego o uziarnieniu $< 0,1$ mm, który, nie znajdując zastosowania, stanowi uciążliwy odpad generujący koszty składowania.

W artykule omówiono możliwości otrzymania lekkich kruszyw szklano-krystalicznych na bazie surowego perlitu i odpadowego pyłu perlitowego do produkcji elementów budowlanych o właściwościach pochłaniających dźwięk. Przedstawiono wyniki badań dotyczące określenia fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku oraz właściwości fizycznych kruszywa szklano-krystalicznego, takich jak: gęstość objętościowa, gęstość nasypowa, nasiąkliwość, mrozoodporność, odporność na miazdzenie, reaktywność alkaliczna. Wyniki badań próbek betonu z wykorzystaniem kruszywa szklano-krystalicznego porównano z właściwościami betonów na bazie keramzytu.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na właściwości dźwiękochłonne kruszywa szklano-krystalicznego, a tym samym jego przydatność do stosowania w konstrukcji biernych zabezpieczeń przeciwhałasowych jako materiału chroniącego przed nadmiernym hałasem w budownictwie kubaturowym, kolejowym czy drogowym.

* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, p.fudalej@icimb.pl

** Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, m.najduchowska@icimb.pl

*** Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, p.pichniarczyk@icimb.pl

1. Wstęp

Rozwój przemysłu materiałów budowlanych wymaga poszukiwania nowych, tańszych materiałów i surowców, o lepszych właściwościach niż tradycyjnie stosowane. Jednym z surowców, na bazie którego możliwe jest uzyskanie nowych materiałów, mogących mieć szerokie zastosowanie w branży materiałów budowlanych, jest perlit. Podczas procesu jego ekspansji, obok ściśle określonych frakcji perlitu ekspandowanego, powstaje również znaczna ilość pyłu perlitowego o uziarnieniu $< 0,1$ mm, który, nie znajdując zastosowania, stanowi uciążliwy odpad generujący koszty składowania. Jednym z kierunków zastosowania pyłu perlitowego może być wytwarzanie lekkich kruszyw szklano-krystalicznych [1].

Wśród wykonawców przegród ograniczających hałas oraz projektantów obserwuje się duże zainteresowanie nowymi materiałami o dobrych właściwościach akustycznych. Podyktowane jest to głównie czynnikiem ekonomicznym, stąd też między innymi występuje tak duże zainteresowanie materiałami odpadowymi pochodzącymi z recyklingu oraz materiałami alternatywnymi, tańszymi. Firmy szukają materiałów o zbliżonych lub lepszych właściwościach akustycznych od materiałów stosowanych standardowo, które zapewniają jednocześnie lepszą odporność na czynniki atmosferyczne i chemiczne oraz charakteryzują się dużą trwałością.

W rozwiązaniach przegród ograniczających hałas stosuje się z reguły dwa materiały skojarzone ze sobą jako podwójna warstwa. Są to materiały dźwiękochłonne, np. wełna mineralna czy keramzyt i dźwiękoizolacyjne, np. beton zwykły lub ciężki. Materiały dźwiękochłonne mają za zadanie pochłanianie energii fali dźwiękowej, natomiast materiały dźwiękoizolacyjne odbicie fali dźwiękowej.

Przy wykonywaniu przegród ograniczających hałas stosuje się oprócz wełny mineralnej prefabrykaty wykonane z materiałów ziarnistych, takich jak zrębko-beton lub keramzytobeton.

W artykule omówiono możliwości otrzymania lekkich kruszyw szklano-krystalicznych na bazie surowego perlitu i odpadowego pyłu perlitowego do produkcji elementów budowlanych o właściwościach pochłaniających dźwięk. Przedstawiono wyniki badań wstępnej oceny właściwości pochłaniających dźwięk kruszywa szklano-krystalicznego, a tym samym określenie jego przydatności do stosowania w konstrukcji biernych zabezpieczeń przeciwhałasowych, jako materiał chroniący przed nadmiernym hałasem, zarówno w budownictwie kubaturowym, kolejowym, jak i drogowym.

2. Wady i zalety stosowanych przegród ograniczających hałas

Prefabrykaty służące do ochrony przed nadmiernym hałasem, wykonane z wykorzystaniem wełny mineralnej, to najczęściej elementy zabudowy ciągów ko-

munikacyjnych tzw. zielona ściana. Charakteryzują się one dość dobrymi parametrami pochłaniania dźwięku, prostotą wykonania oraz stosunkowo niskimi kosztami produkcji. Do wad tych ekranów można zaliczyć stosunkowo niską trwałość. Ze względu na niską cenę cieszą się one jednak największym zainteresowaniem wykonawców.

Keramzytobeton i zrębkobeton występuje w ekranach akustycznych najczęściej jako materiał skojarzony z płytą betonową będącą elementem konstrukcyjnym. Posiadają one wiele zalet. Oprócz parametrów pochłaniających dźwięk, charakteryzują się dużą trwałością oraz estetyką. Producenci produkujący tego typu ekrany akustyczne borykają się natomiast z problemami związanymi z ceną ich wykonania. Głównym materiałem wykorzystywanym do produkcji zrębkobetonu są zrębki drewna iglastego o określonych właściwościach, obecnie na rynku odnotowano problemy z pozyskaniem takiego materiału do wytwarzania ekranów akustycznych. Ekrany akustyczne z wykorzystaniem keramzytobetonu mają podobną budowę jak ekrany wykonane ze zrębkobetonu. Keramzytobeton uważany jest za najdroższy, a tym samym najmniej popularny w budownictwie drogowym.

3. Otrzymywanie kruszywa szklano-kryształicznego

Do prób syntezy materiałów szklano-kryształicznych wytypowano surowy perlit mielony, o uziarnieniu ok. 0,063 mm. Próby rozpoczęto od zestawów surowcowych zawierających: perlit – 100g, Na_2CO_3 – 10,3 g, CaCO_3 – 44,0 g i Fe_2O_3 – 3,0 g [1]. Do składu podstawowego dodawano węgiel aktywny jako materiał spieniający (0,3–1,0%), TiO_2 jako nukleator krystalizacji (0,5–2%) oraz surowiec fosforanowy w postaci uwodnionego fosforanu sodowego (jedno- i dwusodowego) lub szlamu fosforanowego. Z dodatkiem roztworu sodowego szkła wodnego ręcznie formowano granule o średnicy ok. 0,5–0,8 cm, które poddawano wypalaniu w elektrycznym piecu laboratoryjnym w temperaturze 850–900°C. Pomimo dużej porowatości uzyskiwane materiały granulowane nie wykazywały kruchości. Porównanie stopnia porowatości materiałów otrzymanych z wstępnych prób z różną zawartością węgla pozwoliło ustalić, że jego optymalny dodatek powinien wynosić ok. 1% [1].

Do zestawu surowcowego stosowano też dodatek wodorotlenku wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lub węglanu wapnia, w przeliczeniu na tę samą ilość wprowadzanego CaO . Wodorotlenek wapnia miał postać pylistą. Wprowadzenie CaO w postaci wodorotlenku wapnia ułatwiło w związku z tym mieszanie składników, co pozwoliło zwiększyć jednorodność zestawów surowcowych. Ponadto wodorotlenek wapnia ulega rozkładowi termicznemu w temperaturze 600°C, o przeszło 200°C niższej niż węglan wapnia i dzięki obecności grup hydroksylowych wykazuje większą reaktywność w podwyższonych temperaturach. Dzięki temu możliwa jest popra-

wa stopnia spęcznienia przy równoczesnym zmniejszeniu ilości porów otwartych na powierzchni otrzymywanych materiałów oraz skrócenie czasu ogrzewania dla osiągnięcia właściwej temperatury wypału [1].

Biorąc pod uwagę problemy ze składowaniem i brakiem zastosowań odpadu perlitu ekspandowanego, przeprowadzono także próby otrzymywania materiałów szklano-krystalicznych z dodatkiem tego odpadu, by ustalić możliwości jego wykorzystania i wpływu na właściwości otrzymywanych materiałów. Próby wykonywano na próbkach zestawów surowcowych, w których część surowego perlitu w ilości 5–25% zastępowano odpadem perlitowym. Ze względu na postać pylistą i bardzo niski ciężar nasypowy, a w związku z tym dużą objętość w stosunku do masy, odpad jest trudniejszy w stosowaniu niż pozostałe składniki zestawu surowcowego i nie powoduje zmniejszenia porowatości.

Zestawy surowcowe zoptymalizowane w wyniku prób laboratoryjnych wytypowano do prób granulowania w skali półtechnicznej. Wytworzony granulát poddano wypalaniu w temperaturze ok. 930–940°C w piecu obrotowym do wypału klinkieru portlandzkiego o wydajności rzędu 40–50 kg/h. W wyniku tych prób otrzymano lekkie porowate tworzywo szklano-krystaliczne w formie kruszywa, przedstawione na rycinie 4.

4. Właściwości fizyczne kruszywa szklano-krystalicznego

Właściwości fizyczne otrzymywanego kruszywa szklano-krystalicznego przedstawiono w tabeli 1 [1].

Tabela 1

Właściwości fizyczne uzyskanego kruszywa szklano-krystalicznego

Właściwości	Kruszywo szklano-krystaliczne
Gęstość objętościowa wg PN-EN 1097-6:2002 [Mg/m ³]	1,2
Gęstość nasypowa w stanie luźnym wg PN-EN 1097-3:2000 [Mg/m ³]	0,6
Nasiąkliwość po 24 h wg PN-EN 1097-6:2002 [%]	22,6
Odporność na miażdżenie wg PN-EN 13055-1:2003 [N/mm ²]	1,9
Mrozoodporność wg PN-EN 13055-1:2003, załącznik C. Ubytek masy po 20 cyklach zamrażania [%]	0,5
Reaktywność wg PN - 91/B-06714.34 [%]	0,016

Źródło: Opracowanie własne.

Przeprowadzone badania wskazują, że otrzymane kruszywo szklano-kryształiczne można zaliczyć do kruszyw lekkich. Gęstość objętościowa badanego kruszywa wynosi ok. $1,2 \text{ Mg/m}^3$ (wymaganie normowe poniżej $2,00 \text{ Mg/m}^3$). Gęstość nasypowa kruszywa jest zdeterminowana gęstością ziaren oraz ich kształtem. Gęstość nasypowa w stanie luźnym kruszywa szklano-kryształicznego wynosi ok. $0,6 \text{ Mg/m}^3$.

Uzyskana nasiąkliwość kruszywa szklano-kryształicznego jest podobna jak nasiąkliwość kruszywa keramzytowego i jest relatywnie wysoka. Nasiąkliwość kruszyw spiekanych, zależnie od struktury porowatości ziaren, waha się w przedziale od 2% do ponad 40%. Duża nasiąkliwość kruszyw porowatych stanowi istotny problem przy komponowaniu mieszanek betonowych z uwagi na to, że zmienia współczynnik wodno-cementowy, natomiast może się okazać parametrem pożądanym przy określaniu własności akustycznych z uwagi na wysoką porowatość. Może też powodować w dalszej konsekwencji zmniejszenie mrozoodporności betonu.

Mrozoodporność badanego kruszywa jest wysoka – ubytek masy po 20 cyklach zamrażania/rozmarzania wynosi tylko 0,5%.

Odporność na miażdżenie kruszywa szklano-kryształicznego wynosi ok. $1,9 \text{ N/mm}^2$, dla kruszyw spiekanych wartość ta waha się z reguły od 0,5 do 15 MPa.

Kruszywo nie wykazuje reaktywności alkalicznej. Zmiany liniowe badanego kruszywa nie przekraczają wartości 0,1% początkowego wymiaru badanych beleczek (otrzymany wynik to 0,016%).

5. Właściwości akustyczne kruszywa szklano-kryształicznego

Pomiary akustyczne, których celem jest określenie wartości fizycznego współczynnika pochłaniania, przeprowadzono wykorzystując metodę fali stojącej [2–4]. Zestaw badawczy składał się z rury impedancyjnej, sondy mikrofonowej, urządzenia do przesuwania i pozycjonowania sondy mikrofonowej, aparatury przetwarzającej sygnał mikrofonowy, głośnika, generatora, pochłaniającego zakończenia rury impedancyjnej i termometru.

Użyta do pomiarów rura impedancyjna to rura Kundta typ 4002 firmy Bruel&Kjaer o przekroju kołowym. Zestaw ten zawiera dwie rury o średnicach wewnętrznych $\phi 100 \text{ mm}$ i $\phi 30 \text{ mm}$. Rura wykonana jest ze stali o grubości ścianki $g = 2,5 \text{ mm}$.

Sonda mikrofonowa w zestawie pomiarowym jest sondą rurkową wykonaną z mosiądzu, zamontowaną centralnie i podpartą w celu uniknięcia jej wygięcia.

Roboczy zakres pomiarowy w skali częstotliwościowej fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku jest określony przez długość i wymiar poprzeczny rury

impedancyjnej. Najniższa częstotliwość odpowiada długości fali równej długości rury, zaś częstotliwość najwyższa odpowiada długości fali dwa razy większej od średnicy rury. Rura Kundta typ 4002, użyta do badań akustycznych kruszywa szklano-krystalicznego, jest przyrządem składającym się z dwóch rur o średnicach wewnętrznych ϕ 100 mm i ϕ 30 mm, co pozwalało wyznaczyć fizyczny współczynnik pochłaniania w zakresie częstotliwości od 100,0 Hz do 6,3 kHz. Badania akustyczne przeprowadzono w pasmach 1/3 oktaawowych częstotliwości.

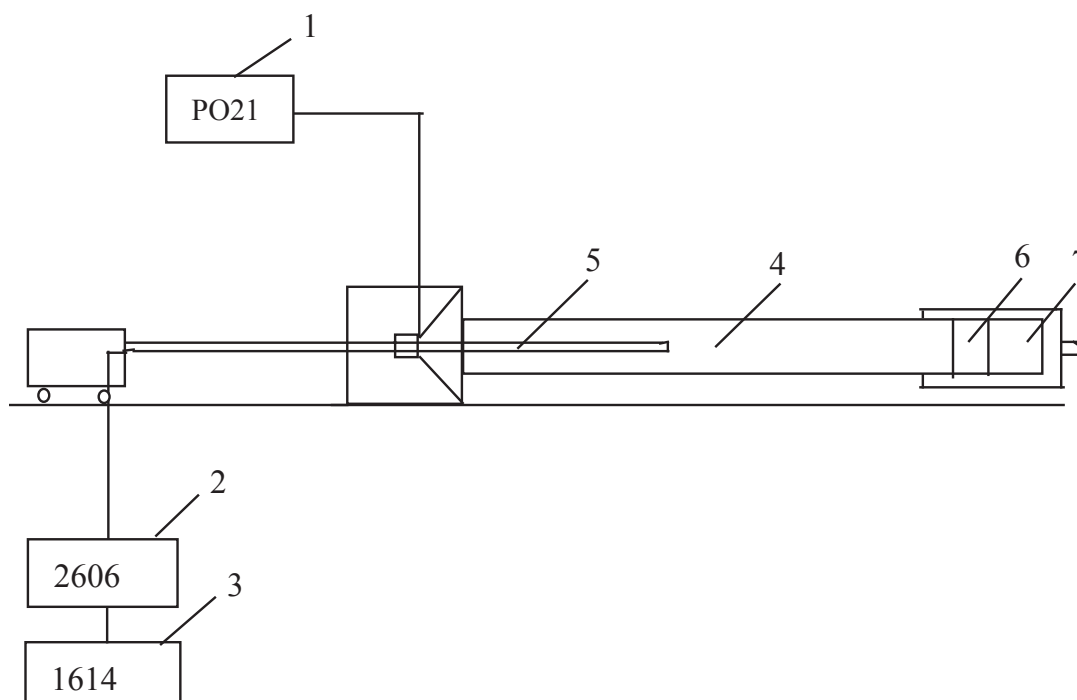
Do uzyskania fali stojącej w rurze impedancyjnej wykorzystano generator akustyczny PO-21 (sinusoidalne źródło dźwięku). Aby uniknąć możliwości powstania w czasie pomiarów niepożądanych zniekształceń nieliniowych w głośniku, na wskutek których mogą w rurze powstać fale stojące dla wszystkich składowych tych zniekształceń (zmniejszając tym samym dokładność pomiaru), zastosowano na wyjściu mikrofonu układ filtrów tercjowo-oktaawowych firmy B&K typ 1614, który dostraja się kolejno do odpowiednich częstotliwości generatora akustycznego.

Badana próbka umieszczana była w pojemniku na próbki (ryc. 3), który jest oddzielną jednostką rury Kundta typ 4002. Do badanej próbki ściśle przylegał krążek uszczelniający, a tylna płyta pojemnika na próbki ściśle przylegała do rury. Odległość płaszczyzny odniesienia od powierzchni badanej próbki wynosiła zero.

Ponieważ tłumienie fali bezpośredniej i odbitej, które zależy w pewnym stopniu od tarcia cząstek powietrza o ścianki rury rośnie wraz z odległością od badanej próbki, pomiary ciśnień akustycznych w strzałkach i węzłach fali stojącej przeprowadzono jak najbliżej badanego materiału. Na podstawie pomiarów ciśnień akustycznych w strzałce (p_{\max}) i węźle (p_{\min}) fali stojącej, które są proporcjonalne do wartości napięć odczytywanych na wzmacniaczu pomiarowym B&K typ 2606, wyznaczono fizyczny współczynnik pochłaniania na podstawie zależności:

$$\alpha_{fiz.} = 1 - \left[\frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\max} + p_{\min}} \right]^2$$

System pomiarowy wykorzystany do wyznaczenia wartości fizycznego współczynnika pochłaniania materiałów pokazano na rycinie 1.

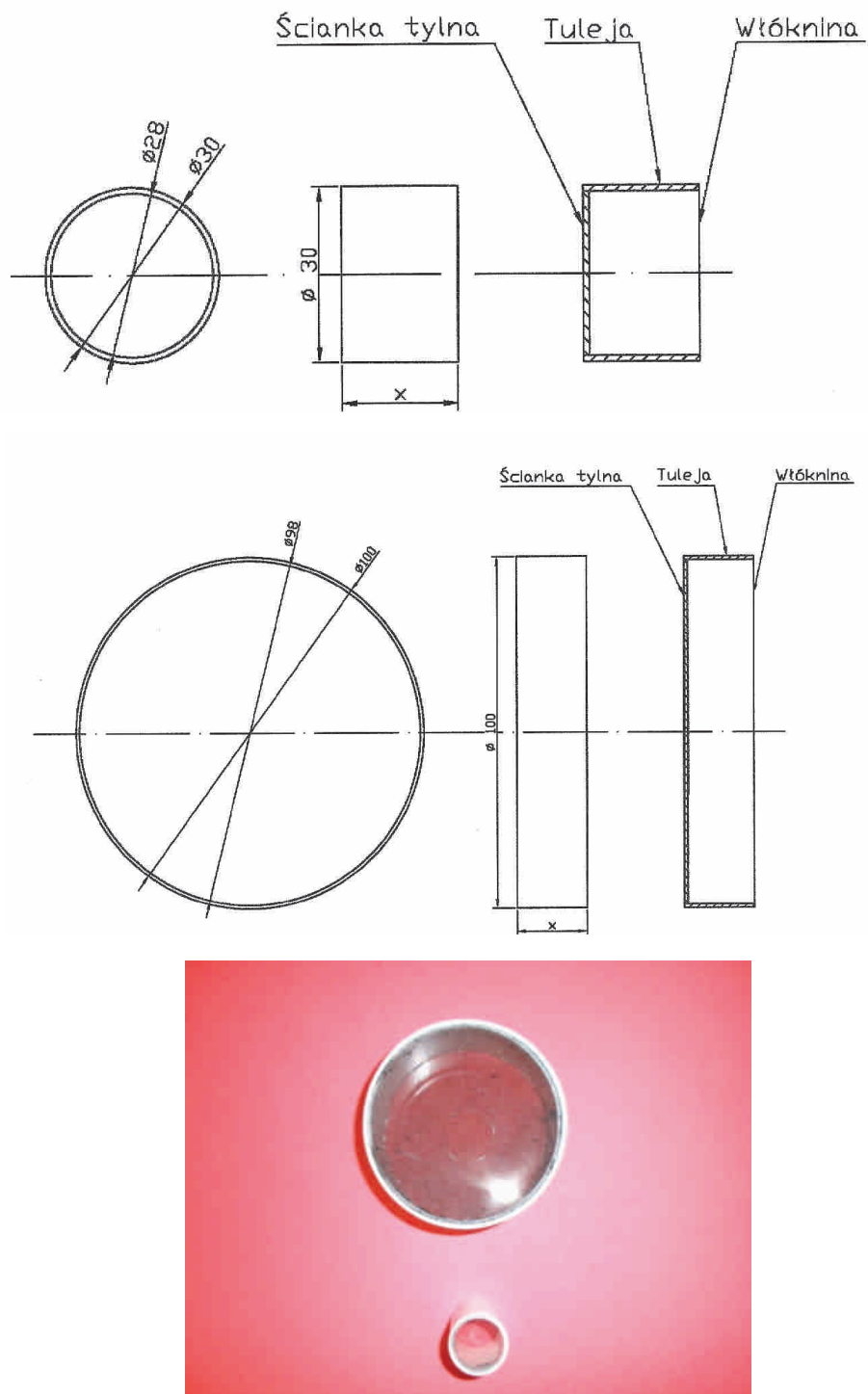


Ryc. 1. Schemat pomiarowy do wyznaczania fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku [2]: 1 – generator akustyczny PO-21, 2 – wzmacniacz pomiarowy BiK 2606, 3 – układ filtrów pasmowych BiK 1614, 4 – rura Kundta 4002, 5 – sonda mikrofonowa, 6 – badany materiał, 7 – krążek uszczelniający

Zastosowano do pomiarów rurę impedancyjną Kundta typ 4002 firmy Bruel & Kjaer o przekroju kołowym.



Ryc. 2. Widok aparatury pomiarowej do wyznaczania fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku [2]



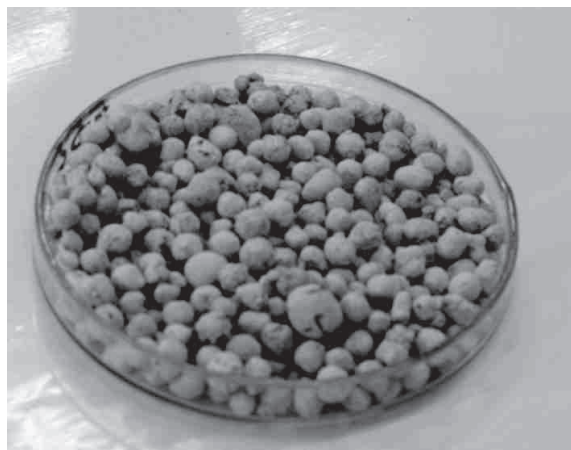
Ryc. 3. Widok pojemnika na próbki [4]

Do badań przygotowano 3 zestawy próbek materiałowych:

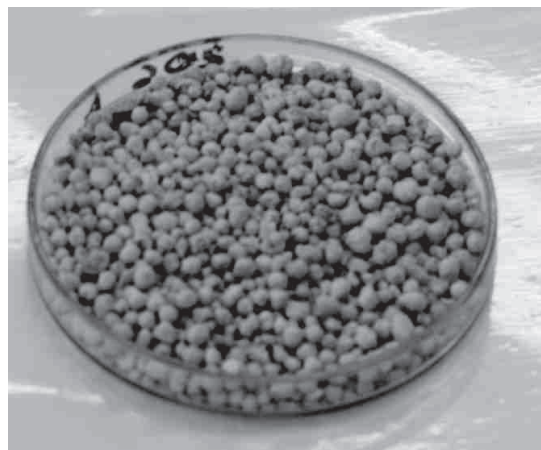
- 1) granulit kruszywa szklano-krystalicznego, frakcja ziarna (4–10) mm;
- 2) granulit kruszywa szklano-krystalicznego, frakcja ziarna (2–4) mm;

3) granulatu kruszywa szklano-kryształicznego (mieszanka granulatu 1 i 2 w stosunku objętościowym 1:1), frakcja ziarna (2–10) mm.

Wszystkie trzy zestawy próbek kruszywa zostały poddane badaniom akustycznym oraz zostały wykorzystane do przygotowania próbek betonu do badań właściwości fizycznych. Badania akustyczne wykonano dla dwóch grubości, tj. 2 cm i 5 cm. Kruszywo poddane badaniom akustycznym przedstawiono na rycinie 4.



frakcja (4–10) mm



frakcja (2–4) mm

Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Kruszywo szklano-kryształiczne

Otrzymane wyniki wartości fizycznego współczynnika pochłaniania α_f w pasmach 1/3 oktaowych częstotliwości dla badanych próbek materiału przedstawiono w tabeli 2 oraz graficznie na rycinach 5–10. W tabeli 2 podano również średnią wartość fizycznego współczynnika pochłaniania α_{sr} dla badanej próbki.

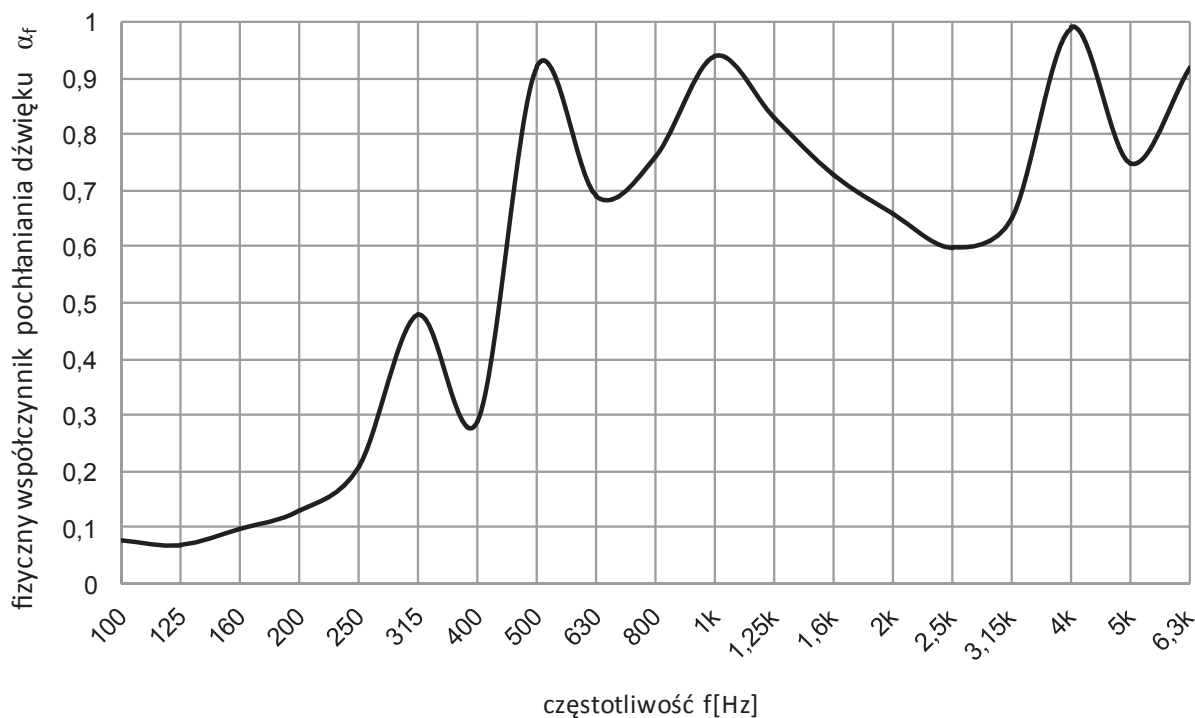
Wyniki badań fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku wskazują, że najkorzystniejszy parametr uzyskano dla próbek o grubości 5 cm. Otrzymane wyniki dla frakcji kruszywa 4/10 i 2/4 różnią się między sobą w sposób nieznaczny. Zastosowanie mieszanki frakcji 2/4 i 4/10 nie wpływa na poprawę fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku. Również ze wzrostem grubości materiału częstotliwość rezonansowa (maksymalne pochłanianie) przesuwa się w kierunku średnich częstotliwości (1000–1600 Hz). Z tego względu materiał ten może być bardzo przydatny do dodatkowych warstw dźwiękochłonnych w panelach ekranów akustycznych, wykładzin budynków itp., gdzie mogą one wpływać na zwiększenie jednoliczbowych wskaźników izolacyjności R_w i D_{LR} . Dla mieszanki frakcji 2/4 i 4/10 uzyskano natomiast dużo lepszy parametr fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku dla grubości próbki 2 cm, niż dla analogicznej grubości w przypadku zastosowania pojedynczej frakcji.

Tabela 2

Fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku kruszywa szklano-kryształicznego

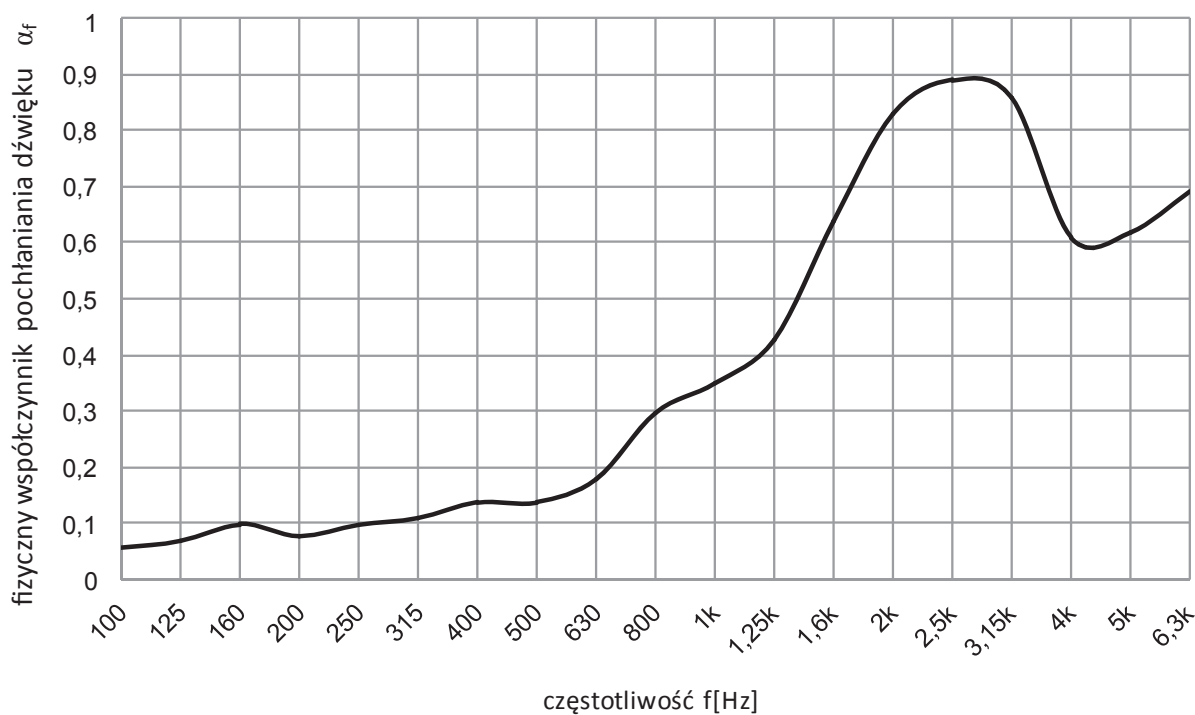
Często- tliwość [Hz]	Wartości fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku α_f					
	kruszywo szklano- -kryształiczne 4-10 grubość 5 cm	kruszywo szklano- -kryształiczne 4-10 grubość 2 cm	kruszywo szklano- -kryształiczne 2-4 grubość 5 cm	kruszywo szklano- -kryształiczne 2-4 grubość 2 cm	kruszywo szklano- -kryształiczne 2-10, mieszanina grubość 5 cm	kruszywo szklano- -kryształiczne 2-10, mieszanina grubość 2 cm
100	0,08	0,06	0,07	0,05	0,07	0,07
125	0,07	0,07	0,10	0,05	0,09	0,07
160	0,10	0,10	0,13	0,08	0,13	0,11
200	0,13	0,08	0,13	0,06	0,14	0,14
250	0,21	0,10	0,18	0,09	0,19	0,18
315	0,48	0,11	0,24	0,09	0,23	0,28
400	0,29	0,14	0,32	0,13	0,33	0,13
500	0,92	0,14	0,42	0,13	0,47	0,15
630	0,69	0,18	0,56	0,17	0,72	0,18
800	0,76	0,30	0,88	0,25	0,89	0,43
1000	0,94	0,35	0,95	0,32	0,95	0,56
1250	0,83	0,43	0,91	0,45	0,86	0,70
1600	0,73	0,64	0,75	0,37	0,65	0,67
2000	0,66	0,83	0,56	0,92	0,53	0,88
2500	0,60	0,89	0,62	0,95	0,63	0,96
3150	0,65	0,86	0,85	0,83	0,82	0,84
4000	0,99	0,61	0,79	0,57	0,89	0,60
5000	0,75	0,62	0,66	0,49	0,65	0,57
6300	0,92	0,69	0,87	0,61	0,89	0,66
Wartość średnia	$\alpha_{sr} = 0,57$	$\alpha_{sr} = 0,38$	$\alpha_{sr} = 0,53$	$\alpha_{sr} = 0,35$	$\alpha_{sr} = 0,53$	$\alpha_{sr} = 0,43$

Źródło: Opracowanie własne.



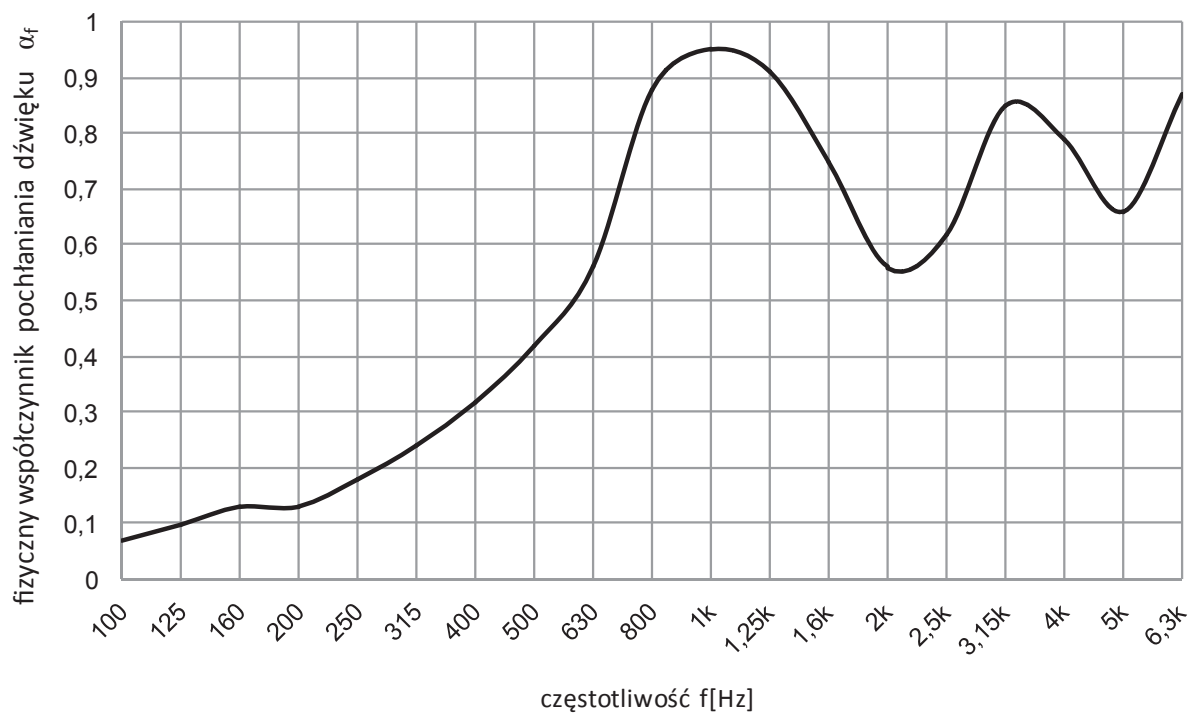
Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 5. Fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku dla kruszywa szklano-kryształicznego o frakcji 4/10 i grubości próbki 5 cm



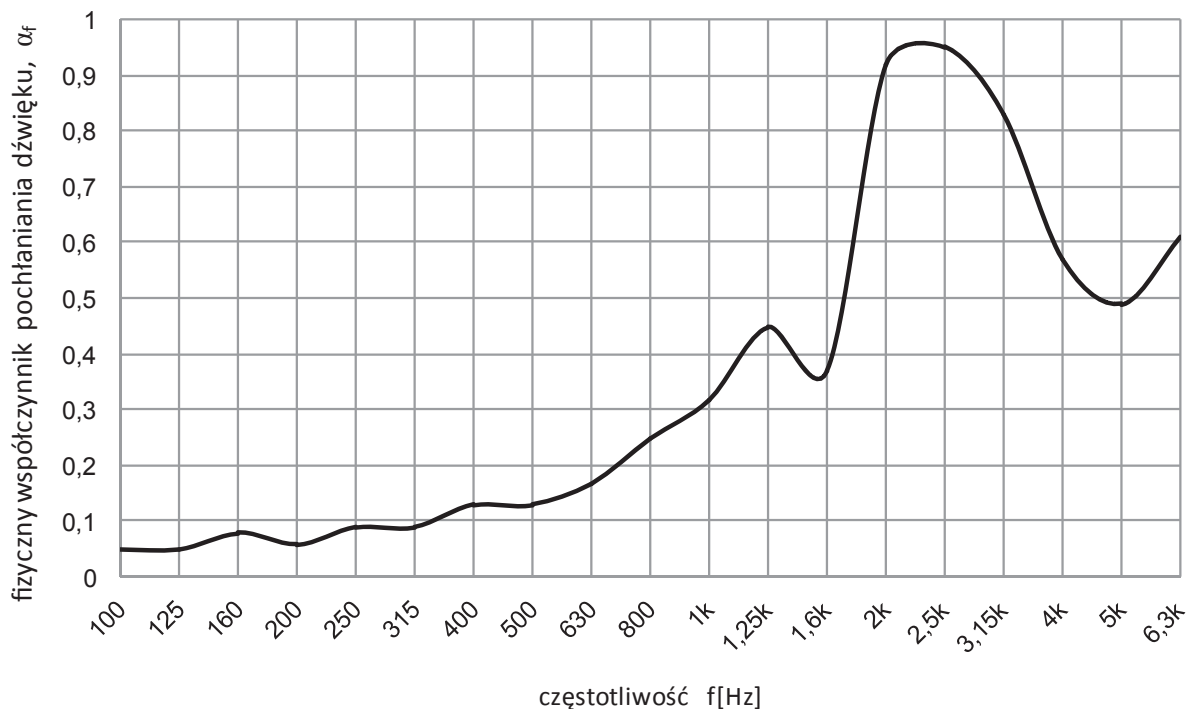
Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 6. Fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku dla kruszywa szklano-kryształicznego o frakcji 4/10 i grubości próbki 2 cm



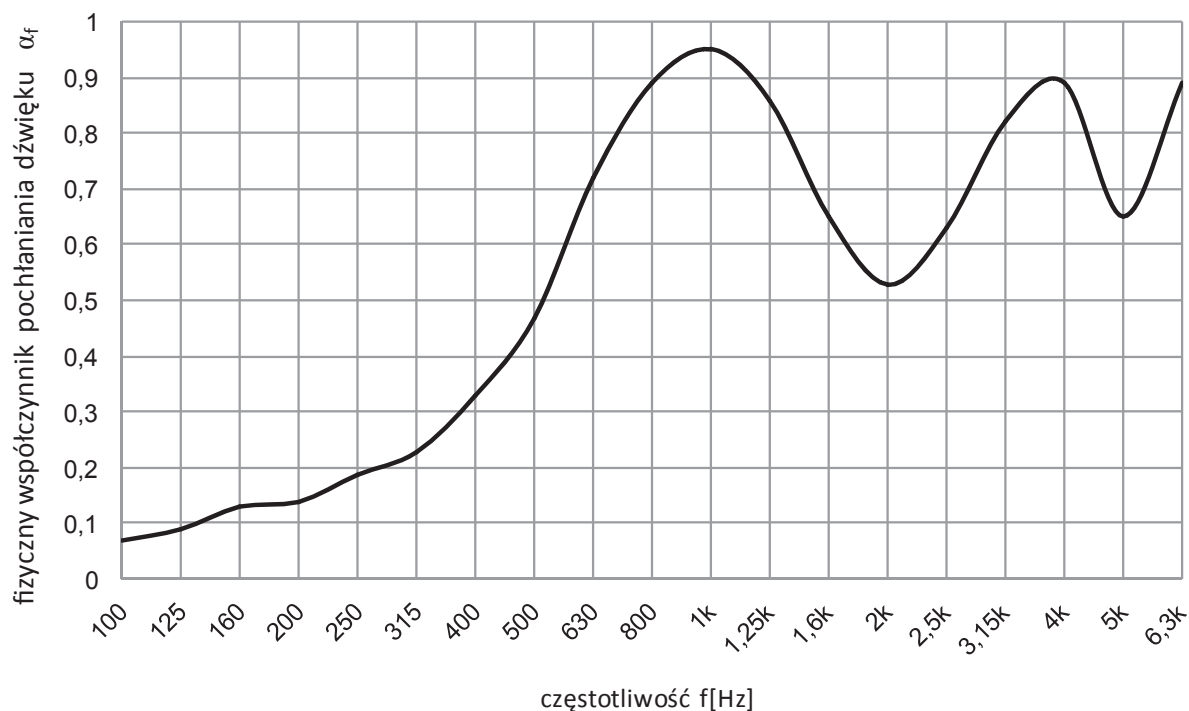
Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 7. Fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku dla kruszywa szklano-krystalicznego o frakcji 2/4 i grubości próbki 5 cm



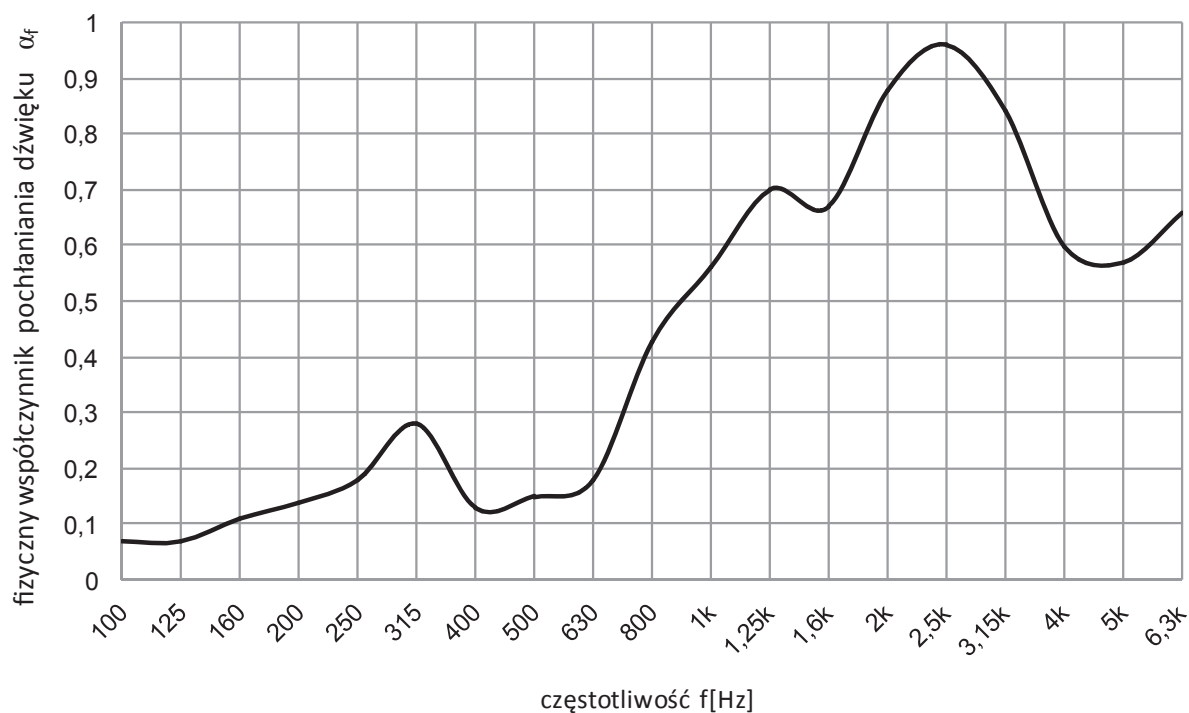
Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 8. Fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku dla kruszywa szklano-krystalicznego o frakcji 2/4 i grubości próbki 2 cm



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 9. Fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku dla kruszywa szklano-kryształicznego o frakcji 2/10 i grubości próbki 5 cm



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 10. Fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku dla kruszywa szklano-kryształicznego o frakcji 2/10 i grubości próbki 2 cm

6. Porównanie fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku kruszywa szklano-krystalicznego z innymi materiałami

W tabeli 3 oraz na rycinie 11 przedstawiono porównanie wartości fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku kruszywa szklano-krystalicznego z innymi materiałami. Z uwagi na bardzo ograniczoną liczbę dostępnych opracowań dokonano tego dla materiałów ziarnistych wąskopasmowych o przybliżonej granulacji 2/4, 4/10 i 2/10. Otrzymane wyniki badań fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku wskazują, że najkorzystniejszy parametr otrzymano dla próbek o grubości 5 cm. Uzyskane wyniki dla frakcji kruszywa 4/10 i 2/4 różnią się między sobą w sposób nieznaczny. Zastosowanie mieszaniny frakcji 2/4 i 4/10 nie wpływa na poprawę fizycznego współczynnika dźwięku.

Dla mieszaniny frakcji 2/4 i 4/10 uzyskano natomiast dużo lepszy parametr fizycznego współczynnika dźwięku dla grubości próbki 2 cm, niż dla analogicznej grubości w przypadku zastosowania pojedynczej frakcji.

Przedstawione wyniki wskazują na bardzo dobre parametry współczynnika pochłaniania dźwięku w porównaniu z keramzytem i styropianem.

Kruszywo szklano-krystaliczne można zaklasyfikować do materiałów wąskopasmowych, z uwagi na to, że większe pochłanianie dźwięku występuje dla częstotliwości od 800 do 1,25 kHz. Granulaty o pochłanianiu wąskopasmowym w zakresie częstotliwości 500–2000 Hz są bardzo przydatne jako dodatkowe warstwy dźwiękochłonne w różnego rodzaju panelach, ekranach akustycznych stosowanych w drogownictwie i na kolei.

T a b e l a 3

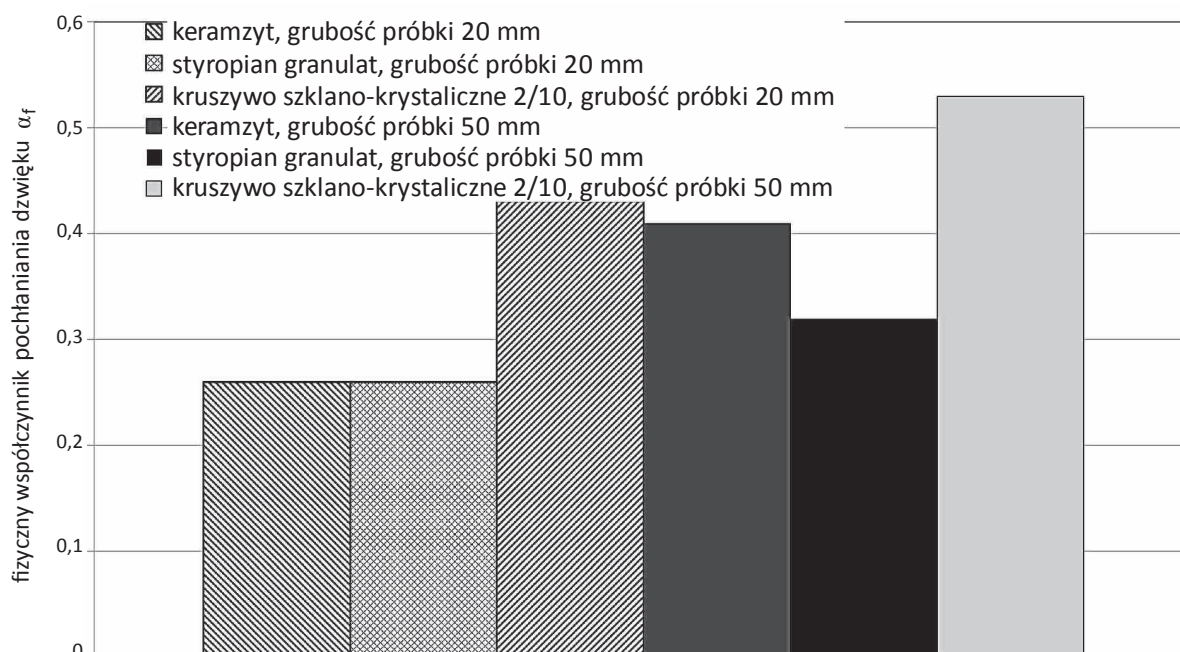
Porównanie fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku dla różnych materiałów wąskopasmowych

Częstotliwość [Hz]	Wartości fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku α_f					
	keramzyt* grubość 20 mm	keramzyt* grubość 50 mm	styropian granulat** grubość 20 mm	styropian granulat** grubość 50 mm	kruszywo szklano- krystaliczne 2-10, mieszanina grubość 20 mm	kruszywo szklano- krystaliczne 2-10, mieszanina grubość 50 mm
100	0,036	0,054	0,029	0,039	0,07	0,07
125	0,043	0,077	0,031	0,030	0,07	0,09
160	0,058	0,057	0,044	0,052	0,11	0,13
200	0,050	0,059	0,041	0,039	0,14	0,14
250	0,066	0,039	0,053	0,059	0,18	0,19
315	0,059	0,102	0,046	0,059	0,28	0,23
400	0,063	0,132	0,065	0,057	0,13	0,33

cd. tab. 3

Często- tliwość [Hz]	Wartości fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku α_f					
	keramzyt* grubość 20 mm	keramzyt* grubość 50 mm	styropian granulat** grubość 20 mm	styropian granulat** grubość 50 mm	kruszywo szkłano- krystaliczne 2-10, mieszanina grubość 20 mm	kruszywo szkłano- krystaliczne 2-10, mieszanina grubość 50 mm
500	0,079	0,185	0,058	0,095	0,15	0,47
630	0,102	0,306	0,076	0,185	0,18	0,72
800	0,164	0,543	0,096	0,325	0,43	0,89
1000	0,217	0,869	0,197	0,586	0,56	0,95
1250	0,311	0,834	0,215	0,852	0,70	0,86
1600	0,439	0,593	0,330	0,768	0,67	0,65
2000	0,581	0,403	0,514	0,521	0,88	0,53
2500	0,790	0,467	0,735	0,445	0,96	0,63
3150	0,816	0,665	0,889	0,424	0,84	0,82
4000	0,500	0,951	0,816	0,543	0,60	0,89
5000	0,310	0,556	0,458	0,681	0,57	0,65
6300	0,313	0,953	0,290	0,348	0,66	0,89
Wartość średnia	$\alpha_{sr} = 0,26$	$\alpha_{sr} = 0,41$	$\alpha_{sr} = 0,26$	$\alpha_{sr} = 0,32$	$\alpha_{sr} = 0,43$	$v_{sr} = 0,53$

Źródło: Opracowanie własne, dane literaturowe: * - [5], ** - [6].



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 11. Porównanie fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku dla keramzytu, styropianu oraz kruszywa szkłano-krystalicznego dla różnych grubości próbek

Przedstawione wyniki wskazują na bardzo dobre parametry współczynnika pochłaniania dźwięku w porównaniu z keramzytem i styropianem.

7. Właściwości betonu z udziałem kruszywa szklano-krystalicznego

W tabeli 4 przedstawiono składy badanych mieszanek betonowych, a w tabeli 5 zobrazowano porównanie właściwości betonów wykonanych z udziałem kruszywa szklano-krystalicznego oraz keramzytu. Wykonano badania wstępne właściwości świeżej mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu, takich jak: konsystencja [7], mrozoodporność F 50 [8], wytrzymałość na ściskanie [9], nasiąkliwość [10] i gęstość [11–12].

T a b e l a 4

Składy mieszanek betonowych

Składnik	Ilość [kg/m ³]
Mieszanka betonowa 1	
Cement CEM I 42,5 R Górażdże	250
Kruszywo szklano-krystaliczne	743
Woda	200
Mieszanka betonowa 2	
Cement CEM I 42,5 R Górażdże	250
Keramzyt	341
Woda	200

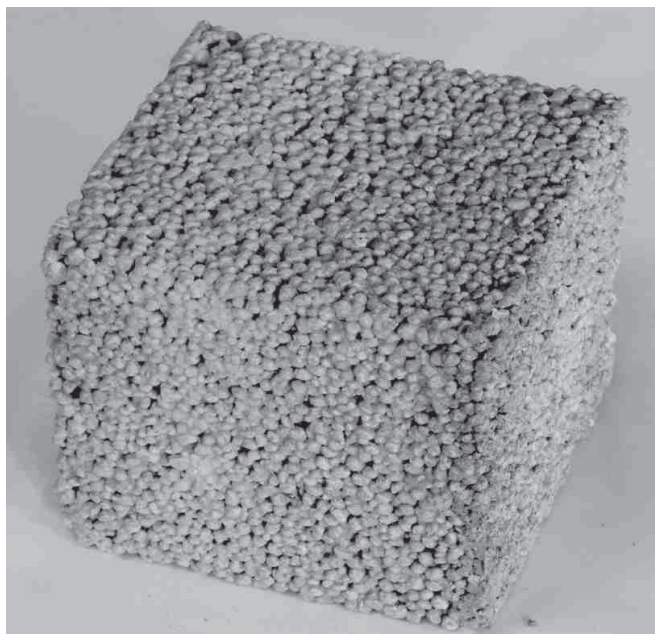
Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

W betonach zastosowano różne frakcje kruszywa szklano-krystalicznego i keramzytu (tab. 5). Przy wykonywaniu betonów z wykorzystaniem wymienionych kruszyw nie stosowano piasku, założono również możliwie najmniejszą ilość cementu, by uzyskać jak największą porowatość otwartą stwardniałego betonu. Materiały porowate z reguły posiadają lepsze właściwości akustyczne między innymi pochłaniania dźwięku.

Na rycinie 12 przedstawiono wygląd stwardniałego betonu z kruszywem szklano-krystalicznym.

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że wytrzymałość próbek betonu wykonanych z keramzytu i kruszywa szklano-krystalicznego oraz nasiąkliwość różnią się w sposób nieznaczny. Badanie konsystencji wykazało, że beton z keramzytem charakteryzował się większym rozplywem przy takiej samej ilości cementu i tym samym współczynnikiem wodno-cementowym. Betony różniły się gęstością świeżej mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu.

Beton z wykorzystaniem keramzytu ma znacznie mniejszą gęstość wynoszącą ok. 30%. Wiąże się to z tym, że keramzyt jest kruszywem lżejszym od kruszywa szklano-kryształicznego. Badania mrozoodporności metodą zwykłą potwierdziły, że betony wykonane z kruszywa szklano-kryształicznego spełniają warunki mrozoodporności dla F50, spadek wytrzymałości nie przekroczył 20% oraz ubytek masy nie przekroczył 5%.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 12. Struktura stwardniałego betonu na bazie kruszywa szklano-kryształicznego o frakcji 2/4

Tabela 5

Właściwości fizyczne betonów z udziałem kruszywa szklano-kryształicznego i keramzytu

Właściwość	Beton z kruszywem szklano-kryształicznym			Beton z keramzytem		
	frakcja 2/4	frakcja 4/10	frakcja 2/10	frakcja 2/4	frakcja 4/10	frakcja 2/10
Nasiąkliwość wg PN-88/B-06250 [%]	21,20	21,00	23,00	21,80	22,00	23,00
Wytrzymałość na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2011 [MPa]	3,80	3,20	3,60	3,10	2,80	3,40
Gęstość świeżego betonu wg PN-EN 12350-6:2011 [kg/m ³]	1,24	1,23	1,25	0,74	0,73	0,75
Gęstość stwardniałego betonu w stanie nasyconym wg PN-EN 12390-7:2011 [kg/m ³]	1,32	1,30	1,31	0,89	0,86	0,89

cd. tab. 5

Gęstość stwardniałego betonu w stanie suchym wg PN-EN 12390-7:2011 [kg/m ³]	1,04	1,02	1,01	0,68	0,69	0,70
Konsystencja świeżej mieszanki betonowej wg PN-EN 12350-5:2011	F2 (390 mm)	F3 (400 mm)	F3 (400 mm)	F3 (460 mm)	F3 (480 mm)	F4 (500 mm)
Mrozoodporność – metoda zwykła F50 wg PN-88/B-06250	ubytek masy średnio 0,4% spadek wytrzymałości średnio 4,5%			-		

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

8. Wnioski

1. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość zastosowania kruszywa szklano-krystalicznego do wykonywania materiałów pochłaniających dźwięk.
2. Uzyskany fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku α_f dla kruszywa szklano-krystalicznego wynosi powyżej 0,4.
3. Kruszywo szklano-krystaliczne można zaklasyfikować do materiałów wąkopasmowych, z uwagi na to, że większe pochłanianie dźwięku występuje dla częstotliwości od 800 do 1,25 kHz.
4. Charakterystyki fizycznego współczynnika dźwięku kruszywa szklano-krystalicznego są porównywalne do charakterystyk materiałów powszechnie stosowanych do biernych zabezpieczeń przeciwhałasowych.
5. Uzyskane wyniki badań właściwości fizycznych wskazują, że betony uzyskane z keramzytu oraz kruszywa szklano-krystalicznego mają porównywalne parametry. Wyjątek stanowi gęstość stwardniałego betonu.

Literatura

- [1] Żelazowska E., Pichniarczyk P., Sacha S., Zawila J., Rybicka-Łada J., Najduchowska M., *Otrzymywanie lekkich kruszyw szklano-krystalicznych na bazie surowca perlitowego i odpadu perlitu ekspandowanego dla przemysłu materiałów budowlanych*, [w:] *Konferencja Naukowo-Techniczna „Przemysł szklarski 2012”*, Ustroń, 10–12 października 2012 r., materiały, Śląska Rada Naczelnej Organizacji Technicznej FSNT w Katowicach, Katowice 2012.
- [2] Określenie fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku materiału zgodnie z normą ISO 10534-1. Raport z badania, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, Kraków 2013.
- [3] PN-EN ISO 10534-1: 2004 – Akustyka: Określenie współczynnika pochłaniania dźwięku i impedancji akustycznej w rurach impedancyjnych. Część 1 – Metoda wykorzystująca współczynnik fal stojących.

- [4] Instrukcja do obsługi stanowiska Rura Kundta – Instructions and Applications 4002 Bruel&Kjaer, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, Kraków.
- [5] G a l a s M., Badania doświadczalne własności dźwiękochłonnych wybranych materiałów ziarnistych, AGH, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków 2008, praca magisterska.
- [6] S i k o r a J., T u r k i e w i c z J., *Ocena właściwości dźwiękochłonnych styropianu*, „Izolacje” 2011, nr 11/12, s. 24–26.
- [7] PN-EN 12350-5 – Badania mieszanki betonowej. Część 5 – Badanie konsystencji metodą stolika rozpluwowego.
- [8] PN-B-06250 – Beton zwykły.
- [9] PN-EN 12390-3 – Badania betonu. Część 3 – Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [10] PN-EN 12350-6 – Badania mieszanki betonowej. Część 6 – Gęstość.
- [11] PN-EN 12390-7 – Badania betonu. Część 7 – Gęstość betonu.

PIOTR FUDALEJ
MARZENA NAJDUCHOWSKA
PAWEŁ PICHNIARCZYK

PREPARATION AND APPLICATION POSSIBILITIES OF GLASS-CRYSTALLINE AGGREGATES IN THE PREPARATION OF SOUND-ABSORBING MATERIALS

Keywords: perlite, expanded perlite, glass-crystalline aggregates, elements of sound-absorbing, sound-absorbing materials.

The development of building materials industry requires a search for new, less expensive materials and raw materials with better properties than the traditionally used. One of the raw materials on the basis of which it is possible to obtain new materials that could be widely used in building materials is perlite. During its expatiation next to well-defined fraction of expanded perlite a significant amount of dust pearlitic grain size < 0.1 mm is also produced, which applications cannot be found, therefore, cumbersome waste storage costs occurs.

The article discusses the possibility of obtaining lightweight glass-crystalline aggregates on the basis of raw perlite dust and pearlitic waste for the production of building elements of sound-absorbing properties.

The results of studies concerning the determination of sound absorption coefficients and physical properties of glass-crystalline aggregates such as; bulk density, water absorption, frost resistance, resistance to crushing, the reactivity of alkali are known. These results of the concrete samples using glass-crystalline aggregates compared with the properties of concrete on the basis of expanded clay.

Results of this study indicate that glass-crystalline aggregates have sound-absorbing properties and thus are suitable for use in the construction of passive protections as a material that protects against excessive noise in building, rail or road construction.