

dr inż. Michał Marchacz^{1*)}

ORCID: 0000-0003-3275-1960

dr hab. inż. Artur Nowoświat, prof. PŚ.¹⁾

ORCID: 0000-0002-0277-7388

Mineralna izolacja natryskowa jako materiał poprawiający akustykę wewnątrz

Mineral spray insulation as a material improving the acoustics of the interior

DOI: 10.15199/33.2022.08.03

Streszczenie. W artykule przedstawiono parametry akustyczne pianki natryskowej. Wyniki badań współczynnika pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej wskazują, że ma ona dobre właściwości dźwiękochłonne. Wyniki zweryfikowano przez zastosowanie materiału w pomieszczeniu o przeznaczeniu sakralnym w kształcie kopuły i o kubaturze 14 850 m³. Po zastosowaniu materiału czas pogłosu uległ znacznemu obniżeniu, co poprawiło warunki pogłosowe w pomieszczeniu.

Słowa kluczowe: czas pogłosu; akustyka wewnątrz; współczynnik pochłaniania.

Abstract. The article presents the acoustic parameters of the foam spray. The results of sound absorption coefficient obtained in the reverberation chamber show that the material has good soundproofing properties. Results were verified by applying the material in a dome-shaped sacral room with a cubature of 14 850 m³. Thanks to the use of the material, the reverberation time was significantly reduced. It has improved the reverberation conditions in the room.

Keywords: reverberation time; room acoustics; absorption coefficient.

Właściwości akustyczne wewnątrz mają duży wpływ na sposób odbioru dźwięku przez człowieka w nich przebywającego. Inaczej kształtuje się akustykę wewnątrz do odbioru dźwięku muzycznego, a inaczej do odbioru dźwięku słownego. W projektowaniu akustycznym wewnątrz można wyróżnić dwa nurty. Pierwszym jest kształtowanie czasu pogłosu jako głównego parametru określającego akustykę wewnątrz, natomiast drugi obejmuje percepcję określonych kategorii dźwięków i ich modyfikację. Jedną z metod kształtowania czasu pogłosu w pomieszczeniu jest stosowanie materiałów dźwiękochłonnych.

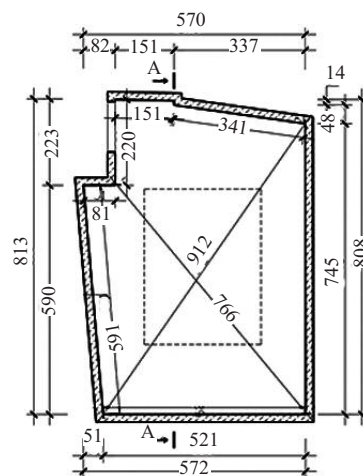
W artykule przedstawiono właściwości akustyczne mineralnej izolacji natryskowej, która została zastosowana w celu poprawy akustyki Kościoła Zielonoświątkowego w Katowicach.

Do opisu właściwości dźwiękochłonnych materiałów służy **współczynnik pochłaniania dźwięku α_w** , określany jako stosunek energii fali akustycznej pochłoniętej przez materiał do energii fali padającej na dany materiał. Współczynnik pochłaniania dźwięku jest bezwymiarowy i przyjmuje wartość z przedziału $<0, 1>$. Współczynnik ten wyznacza

się w przypadku każdego pasma trzecjowego częstotliwości f , w zakresie 100 – 5000 Hz wg PN-EN ISO 354:2005 [1]. Można również posługiwać się **wskaznikiem pochłaniania dźwięku α_w** . Jest on jednoliczbową wielkością niezależną od częstotliwości, której wartość jest równa wartości znajdującej się na krzywej odniesienia dla 500 Hz po przesunięciu w sposób określony normą PN-EN ISO 11654:1999 [2]. W czasie pomiaru istotne jest monitorowanie temperatury, wilgotności powietrza oraz ciśnienia atmosferycznego. Parametry te wpływają na prędkość propagacji dźwięku w powietrzu i są uwzględniane w procedurze pomiarowej zgodnie z zaleceniami zawartymi w normach [1, 3]. Badania właściwości pochłaniających wykonano w komorze pogłosowej, której rzut pokazano na rysunku 1.

Badania laboratoryjne właściwości akustycznych

Badana mineralna izolacja natryskowa jest niepalna (klasa A-1 zgodnie z deklaracją producenta), o gęstości 45 kg/m³. Technologia jej nanoszenia na ścianę dopuszcza warstwę grubości do 250 mm przy jednorazowym natrysku [4, 5]. Właściwości akustyczne sprawdzono podczas eksperymentalnych badań w komorze pogłosowej. Próbkę o wymiarach 401,5 x 297,5 x 5 cm przezna-



Rys. 1. Rzut komory pogłosowej
Fig. 1. Plan view of the reverberation chamber

czona do badania współczynnika pochłaniania dźwięku wykonana została przez natryśnięcie materiału na powierzchnię podłogi komory badawczej.

Podczas pomiaru czasu pogłosu w pustej komorze średnia wartość temperatury wynosiła 22,1°C, a wilgotność względna powietrza 28%, natomiast średnia temperatura powietrza w komorze z materiałem na podłodze wynosiła 22,5°C, a wilgotność względna powietrza 23,5%. Ze względu na eksperymentalny charakter badań nie stabilizowano parametrów klimatycznych. Wyniki współczynnika pochłaniania dźwięku wraz z niepewnością pomiarową ze-

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: michal.marchacz@polsl.pl

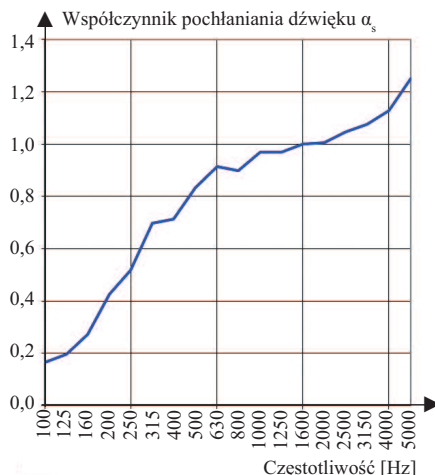
stawiono w tabeli 1. Na ich podstawie stwierdzono, że w pasmach częstotliwości 2000 – 5000 Hz współczynnik pochłaniania dźwięku α_{si} przyjmuje wartości większe od 1, natomiast w ujęciu teoretycznym wartość ta powinna zawierać się w przedziale $<0, 1>$. Taka sytuacja jest dość powszechna w przypadku pomiarów w komorze pogłosowej. Jak pisze Everest [6], a później Nowoświat z zespołem [7], rozproszenie dźwięku na krawędziach próbki badawczej powoduje, że taka próbka pod względem akustycznym wydaje się mieć większą powierzchnię niż ma w rzeczywistości, co prowadzi do wyniku absorpcji większej niż 1 (rysunek 2). Uzupełniając wyniki pomiarów, wyznaczono tzw. ważony współczynnik pochłaniania dźwięku $\alpha_w = 0,8$.

Tabela 1. Współczynnik pochłaniania dźwięku α_s wraz z niepewnością pomiarową $\delta_{95}(\alpha)$
 Table 1. Sound absorption coefficient α_s with measurement uncertainty $\delta_{95}(\alpha)$

f	α_s	$\delta_{95}(\alpha)$
50	0	0
63	0	0
80	0	0
100	0,16	0,00
125	0,20	0,01
160	0,27	0,01
200	0,43	0,01
250	0,52	0,01
315	0,70	0,01
400	0,71	0,01
500	0,83	0,01
630	0,92	0,01
800	0,90	0,01
1000	0,97	0,01
1250	0,97	0,01
1600	1,00	0,01
2000	1,01	0,01
2500	1,05	0,01
3150	1,08	0,01
4000	1,13	0,02
5000	1,25	0,02

Badania terenowe właściwości akustycznych

Weryfikacji przydatności badanego materiału dokonano w budynku kościoła w kształcie kopuły (fotografia). Poza poziomem parteru obiekt ma piętro w postaci balkonów. Kubatura wnętrza wynosi $V = 14850 \text{ m}^3$. Ściany przed adaptacją akustyczną wykończono tynkiem cementowo-wapiennym i pokryto farbą, natomiast po adaptacji akustycznej



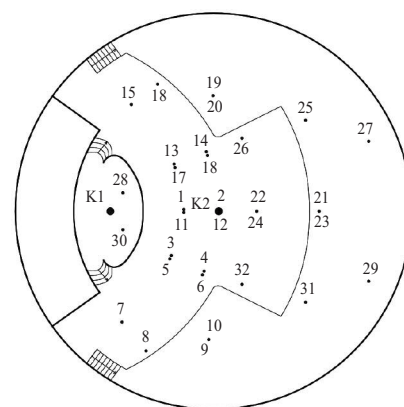
Rys. 2. Współczynnik pochłaniania dźwięku w funkcji częstotliwości
 Fig. 2. Sound absorption coefficient as a function of frequency



Wnętrze budynku kościoła [7]
 Interior of the church [7]

mineralną izolacją natryskową o grubości 150 mm naniesioną na powierzchni ok. 2400 m² (pokryto głównie wewnętrzną powierzchnię kopuły zbliżoną kształtem do sfery). Podłoga sali głównej wyłożona została wykładziną dywanową, a posadzka balkonów wykonana z lastryka. Badania czasu pogłosu przeprowadzono metodą tzw. zanikową. Źródłem dźwięku była kula głośnikowa o wszechkierunkowej charakterystyce wraz z generatorem szumu różowego. Łącznie wytypowano 32 punkty pomiarowe, w tym 22 w celu umiejscowienia kuli głośnikowej w miejscu sceny/ołtarza oraz 10 do ustawienia kuli w centrum geometrycznym obiektu (rysunek 3).

W każdym punkcie dokonano sześciu powtórzeń pomiaru. Wytyczne pomiarowe pochodziły m.in. z PN-EN ISO 3382-1:2009 oraz PN-EN ISO 3382-2:2010

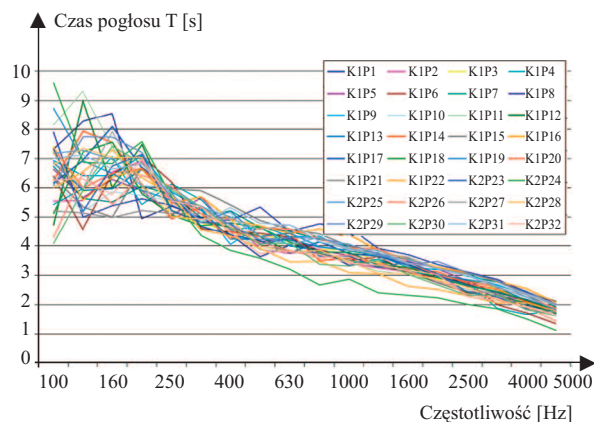


Rys. 3. Schematyczny przekrój budynku z naniesionymi punktami pomiarowymi (1-22 punkty przy ustawieniu źródła K1, 23-32 punkty przy ustawieniu źródła K2) oraz umiejscowieniem źródeł dźwięku (K1, K2) [8]

Fig. 3. Schematic plan view with marked measurements points (1-22 points for K1 sound source, 23-32 points for K2 sound source) and sound sources locations (K1, K2) [8]

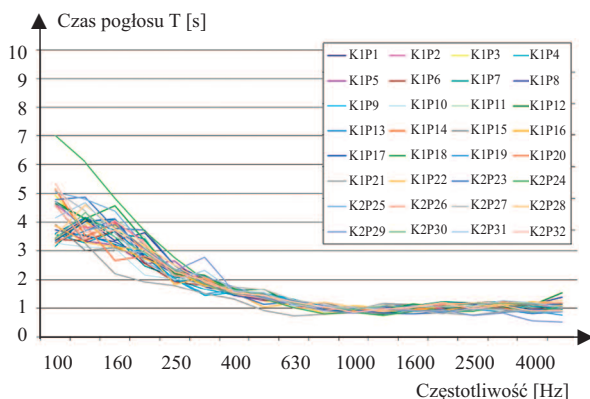
[9, 10]. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki pomiaru czasu pogłosu w funkcji częstotliwości w badanym pomieszczeniu przed i po adaptacji.

Przed adaptacją akustyczną pomieszczenie przedstawiało dość jednolitą odpowiedź na sygnały dźwiękowe o częstotliwości 500; 1000; 2000 i 4000 Hz o średnim odchyleniu standardowym 0,3 s. W przypadku częstotliwości 125 Hz zróżnicowanie odpowiedzi na dany sygnał dźwiękowy było znaczne. Po adaptacji akustycznej czas pogłosu w pomieszczeniu zdecydowanie się skrócił. Ciekawy efekt można zauważyć przy częstotliwości 4000 Hz. Pomimo tego, że



Rys. 4. Czas pogłosu pomieszczenia w funkcji częstotliwości w przypadku pasma tercjowego przed adaptacją akustyczną badanym materiałem

Fig. 4. Reverberation time of the room as a function of frequency for the tertian band before acoustic adaptation with the tested material



Rys. 5. Czas pogłosu pomieszczenia w funkcji częstotliwości w przypadku pasma tercjowego po adaptacji akustycznej badanym materiałem

Fig. 5. Reverberation time of the room as a function of frequency for the tertian band after acoustic adaptation with the tested material

materiał pochłaniający dźwięk ma właściwości akustyczne najlepsze w przypadku wysokich częstotliwości, to czas pogłosu nieznacznie wzrasta w porównaniu z częstotliwością średnią. Efekt ten może być spowodowany kształtem pomieszczenia. W celu lepszego zobrazowania tego zjawiska w tabeli 2 podano średnie wartości pomiarów czasu pogłosu w przypadku pasm częstotliwości oktaowych. Przedstawione wyniki mają postać $x \pm \delta$, gdzie x oznacza uśredniony czas pogłosu dla zmierzonego zakresu częstotliwości, a δ niepewność standardową. Z tabeli 2 wynika, że adaptacja akustyczna poprawia nie tylko akustykę wnętrza przez skrócenie czasu pogłosu, ale również zmniejsza niepewność standardową. Efekt takich działań bardzo dobrze jest widoczny podczas porównania czasów pogłosu różnych budynków sakralnych zebranych w tabeli 3. W związku z tym, że nie dysponowano parametrami pochłaniającymi dźwięk przez materiały występujące w kościele, to niemożliwe było wyko-

Tabela 2. Czas pogłosu w paśmie oktaowym w pomieszczeniu przed adaptacją akustyczną T_1 i po adaptacji T_2
Table 2. Reverberation time for the octave band in the room before acoustic adaptation T_1 and after acoustic adaptation T_2

f	T_1	T_2
125	$6,37 \pm 1,30$	$3,68 \pm 0,37$
250	$5,56 \pm 0,37$	$2,16 \pm 0,21$
500	$4,36 \pm 0,40$	$1,36 \pm 0,16$
1000	$3,75 \pm 0,36$	$0,93 \pm 0,06$
2000	$2,98 \pm 0,22$	$1,00 \pm 0,10$
4000	$1,81 \pm 0,23$	$1,04 \pm 0,12$

nanie weryfikacji pochłaniania przez zastosowany materiał natryskowy. Można jednak stwierdzić, że czas pogłosu skraca się o co najmniej połowę w zależności od pasma częstotliwości.

Dane przedstawione w tabeli 3 wskazują, że wśród naw o podobnej kubaturze czas pogłosu badanego kościoła przed adaptacją był wysoki. Wskazano również, że pomieszczenie do odprawiania nabożeństw w Kościele Zielonoświątkowców ma czas pogłosu podobny do innych kościołów o różnych stylach architektonicznych. Adaptacja akustyczna materiałem natryskowym pozwoliła znacznie skrócić czas pogłosu, tzn. do poziomu 1,1 s dla uśrednionej wartości spośród częstotliwości 500 Hz i 1000 Hz. Polskie standardy nie określają czasu pogłosu w przypadku pomieszczeń sakralnych.

Tabela 3. Czas pogłosu różnych kościołów [7] oraz kościoła w kształcie kopuły w Katowicach
Table 3. Reverberation time for different churches [7] and dome-shape church in Katowice

Kościół	Państwo	Kubatura [m ³]	Styl architektoniczny	Średni (500 – 1000 Hz) czas pogłosu [s]
Zielonoświątkowców przed adaptacją	Polska	14 850	kopuła	4,1
Zielonoświątkowców po adaptacji	Polska	14 850	kopuła	1,1
Sacra di San Michele	Włochy	7 000	romański	5,0
Santi Luca e Martina	Włochy	10 000	barokowy	3,3
Sant' Agnese in Agone	Włochy	14 500	barokowy	5,0
San Lorenzo	Włochy	12 000	barokowy	4,1
Fossanova Abbey	Włochy	17 000	gotycki	6,6
Bom Jesus dos Perdões	Brazylia	5 501	neogotycki	4,61
Messianic Church	Brazylia	933	modernistyczny/współczesny	1,20
„Dives in Misericordia” jubilee church	Włochy	10 500	modernistyczny/współczesny	7,3
Church of Santa Maria Assunta	Włochy	6 300	modernistyczny/współczesny	6,3
Church of San Giovanni Battista	Włochy	9 000	modernistyczny/współczesny	7,7
Church of São Carlos Borromeu	Włochy	2 100	modernistyczny/współczesny	1,35

Podsumowanie

Badana mineralna izolacja natryskowa doskonale spełnia swoją rolę jako materiał dźwiękochłonny. Świadczy o tym wyznaczony wskaźnik $\alpha_w = 0,8$. Można zatem wnioskować, że materiał ten może być stosowany w celu poprawy parametrów pogłosowych pomieszczeń przez zwiększenie ich dźwiękochłonności, a w efekcie skrócenie czasu pogłosu. Zostało to potwierdzone bada-

niami w pomieszczeniu w kształcie kopuły o bardzo dużej kubaturze. W przypadku częstotliwości odpowiadającej mowie, czyli 500 i 1000 Hz, średni czas pogłosu przed adaptacją akustyczną wynosił ponad 4 s, natomiast po adaptacji akustycznej z zastosowaniem badanego materiału skrócił się do 1,1 s. Wynik taki jest znakomitym osiągnięciem w przypadku wielokubaturowego pomieszczenia.

Literatura

[1] PN ISO 354:2005 Akustyka – Pomiar pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej.
 [2] PN-EN ISO 11654:1999 Akustyka – Wyroby dźwiękochłonne używane w budownictwie – Wskaźnik pochłaniania dźwięku.
 [3] PN ISO 9613-1:2000 Akustyka – Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Obliczanie pochłaniania dźwięku przez atmosferę.
 [4] <http://www.suffix.org/technical-data> (dostęp 2022.04.08).
 [5] https://www.izolacje.com.pl/wydania-ebook/IZ_WT-2021/files/basic-html/page11.html (dostęp 2022.04.08).
 [6] Everest FA. Master handbook of acoustics. McGraw Hill, USA, 2001.
 [7] Nowoświat A, Olechowska M, Marchacz M. The effect of acoustical remedies changing the reverberation time for different frequencies in a do-

me used for worship: A case study. Applied Acoustics. 2020; 160, article number 107143.

[8] Materiały własne opracowane na podstawie projektu architektoniczno-budowlanego.
 [9] PN-EN ISO 3382-1:2009 Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 1: Pomieszczenia specjalne.
 [10] PN-EN ISO 3382-2:2010 Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach.

Przyjęto do druku: 27.07.2022 r.