WPŁYW SUFITU PRZESZKLONEGO NA AKUSTYKĘ WNĘTRZ ZABYTKOWYCH

1. WSTĘP

Rozpowszechnionym sposobem poprawy funkcjonalności wewnętrznych dziedzińców w obiektach zabytkowych jest stosowanie szklanych sufitów. Jest to szczególnie efektywne w przypadku dużych wnętrz, gdy przezroczyste przekrycie pozwala na utworzenie nowych funkcji, poszerzających dotychczasową formułę wykorzystania obiektu, często także korzystnie wpływających na jego rentowność.

Pod względem architektonicznym szklany sufit nie tylko stanowi ochronę dziedzińców przed wpływami atmosferycznymi, ale także sprawia wrażenie przebywania w obiekcie otwartym, co podkreśla duża kubatura wnętrza i przezroczystość przekrycia na całej jego powierzchni. W pracy przedstawiono przykłady realizacji, w których został wyeksponowany ten aspekt przekrycia. Omówiono dwa reprezentacyjne dziedzińce Politechniki Gdańskiej, w których szklane przekrycia o spektakularnej formie są powiązane z rewaloryzacją dziedzińców, ze szczególnym uwzględnieniem wypływu tych robót na akustykę powstałej przestrzeni zamkniętej.

2. PRZYKŁADY WIELKOPOWIERZCHNIOWYCH PRZEKRYĆ SZKLANYCH WE WNĘTRZACH ZABYTKOWYCH

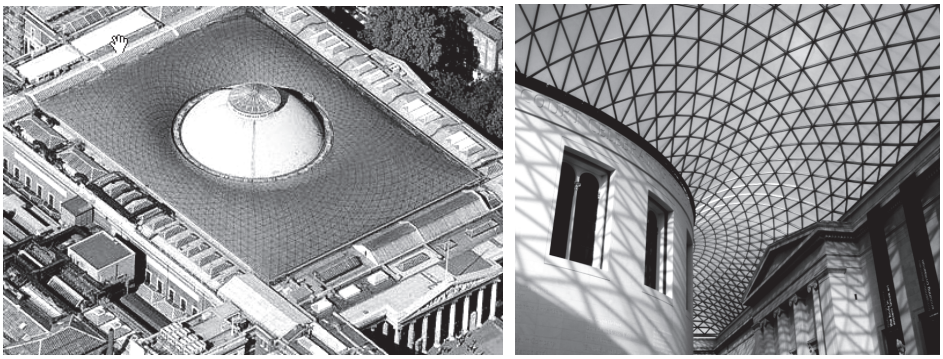
Zastosowanie szklanego przekrycia we wnętrzu zabytkowym niesie wielorakie skutki pozytywne, zgodne z zamysłem projektanta. Zwykle towarzyszą im jednak niekorzystne skutki uboczne, często o nieprzewidzianym charakterze.

Pozytywne skutki zastosowania przekrycia:
- rozszerzenie palety funkcji użytkowych (funkcja reprezentacyjna, koncertowa, konferencyjna, widowiskowa, wystawiennicza, dydaktyczna – w tym np. eksperymentarium fizyczne itp.),
- ekspozycja atrakcyjnego kontekstu architektonicznego przy tworzeniu funkcji użytkowych,
- ochrona elewacji przed wpływami atmosferycznymi,
- poprawa bilansu cieplnego obiektu przez zmniejszenie gradientu temperatury na wewnętrznej elewacji dziedzińca, zwłaszcza na oknach,
- poprawa atrakcyjności i rentowności obiektu jako całości.

Niekorzystne skutki uboczne:
- konieczność wykonania instalacji towarzyszących (wentylacja, oddymianie, oświetlenie, DSO itp.),
- zmniejszenie zrozumiałości mowy wskutek wzrostu pogłosowości,
- pogorszenie komfortu akustycznego spowodowane hałasem pogłosowym.

prof. dr hab. inż. Andrzej Kulowski, Wydział Architektury, Politechnika Gdańska

Przykłady zastosowania sufitów szklanych do przekrycia dziedzińców w obiektach zabytkowych przedstawiono na rysunkach 1-4. W obiektach tych nie zostały podjęte wyraźnie wyeksponowane działania przystosowujące dziedzińce do zmienionych warunków akustycznych.



Rys. 1. Dziedziniec The British Museum w Londynie (ok.1850) [4], (fot. R. Janowicz)

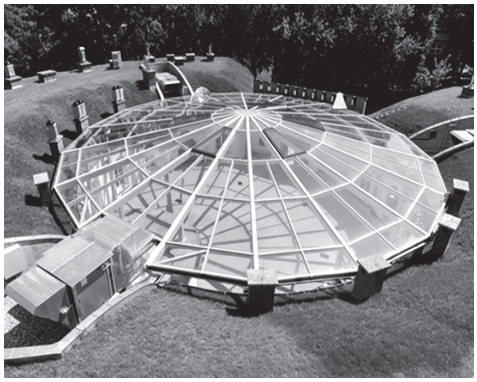
Fig. 1. Courtyard of The British Museum in London (ca.1850) [4] (photo by R. Janowicz)

Rys. 2. Dziedziniec Muzeum Armii Krajowej w Krakowie. Adaptacja budynków koszarowo-magazynowych w kompleksie zaopatrzenia Twierdzy Kraków (1914-1916). Nagroda Brick Award Polska 2013 (pracownia AiR Jurkowscy – Architekci)[12] (fot. P. Piątek, W. Dziedzic)

Fig. 2. Courtyard of Home Army Museum in Krakow. Adaptation of barracks and warehouses in the Krakow Fortress (1914-1916) [12] (photo by P. Piątek, W. Dziedzic)

Rys. 3. Zamek w Gniewie, wiek XIII-XIV [8]

Fig. 3. Gniew Castle, XIII-XIV century [8]



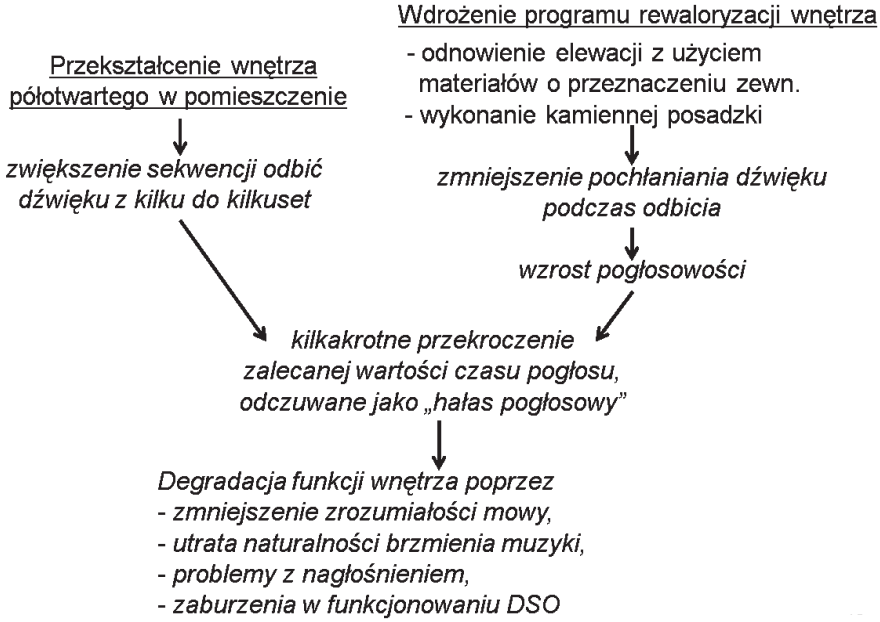
Rys. 4. Fort Sokolnickiego, Warszawa, II połowa XIX wieku. Przekrycie szklane oddane w maju 2012 [9]

Fig. 4. Fort Sokolnickiego, Warsaw, 2nd half of the nineteenth century. Glass roof completed in May 2012 [9]

3. WPŁYW PRZEKRYCIA SZKLANEGO NA AKUSTYKĘ WNĘTRZA

Wykonanie przekrycia nad półotwartym dziedzińcem zmienia go w pomieszczenie zamknięte. Operacji tej nie zawsze towarzyszy świadomość skutków akustycznych, jakie ona niesie. Elewacja dziedzińca jest zwykle wykonana z materiałów o przeznaczeniu zewnętrznym. Są one odporne na wpływy atmosferyczne, a przez to w znikomym stopniu pochłaniające dźwięk. W rezultacie możliwość całorocznego użytkowania dziedzińców następuje kosztem znacznej niekiedy degradacji ich akustyki. Czynniki prowadzące do akustycznej degradacji dziedzińców przekrytych szklanym dachem podano na rysunku 5.

Kroki zaradcze poprawiające akustykę dziedzińców po przekryciu przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 5. Czynniki prowadzące do akustycznej degradacji dziedzińców w obiektach zabytkowych przekrytych szklanym dachem (opracowanie własne)

Fig. 5. Factors leading to the degradation of acoustics in courtyards of historic buildings covered with glass roof (own study)

Rys. 6. Zamek Sułkowskich w Bielsku-Białej, II połowa XIX wieku. Sufit szklany zaopatrzony w ustroje rozpraszające dźwięk, oddany w maju 2014 [6]

Fig. 6. Sułkowski castle in Bielsko-Biala, 2nd half of the nineteenth century. Transparent ceiling glass with sound diffusing elements, completed in May 2014 [6]

Rys. 7. Dziedziniec Deutsches Historisches Museum w Berlinie (1695 r.) Pod sufitem szklanym podwieszona dźwiękochłonna folia mikroperforowana [7]

Fig. 7. Courtyard of Deutsches Historisches Museum in Berlin (1695). Soundabsorbing microperforated foil is suspended under the glass ceiling [7]

4. STUDIUM PRZYPADKU – DZIEDZIŃCE GMACHU GŁÓWNEGO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

4.1. PIERWOTNY STAN DZIEDZIŃCÓW

Gmach Główny Politechniki Gdańskiej (1900-1904) powstał według projektu Alberta Carstena, profesora ówczesnej Technische Hochschule (ur. 1859, zm. 1943 r. w Theresienstadt). Budynek reprezentuje styl neorenesansu niderlandzkiego z wnętrzami w stylu secesyjnym. W skład budynku wchodzą dwa bliźniacze dziedzińce wewnętrzne, pierwotnie funkcjonujące bez zadaszenia. Od 2010 roku dziedzińce noszą nazwy Jana Heveliusza i Daniela Gabriela Fahrenheita.

Dane liczbowe każdego z dziedzińców:

powierzchnia podłogi:	487 m^2,	wysokość:	27 m,
kubatura:	13423 m^3,	okna:	384 m^2,
tynk fakturowy:	1190 m^2,	cegła licowa:	340 m^2,
przekrycie szklane:	695 m^2.		

4.2. AKUSTYKA DZIEDZIŃCÓW PO POŁOŻENIU PRZEKRYCIA

Dziedzińce pozostawały bez zadaszenia do roku 2004, gdy przykryto je szklanymi dachami. Konstrukcję nośną dachów stanowią łukowe kratownice stalowe o rozpiętości ok. 22,5 m. Przeszklenie wykonano z szyb zespolonych z pustką wypełnioną argonem. Warstwę zewnętrzną stanowi szkło hartowane o grubości 10 i 8 mm, zaś wewnętrzną dwie szyby 2 x 4 mm sklejone folią (rys. 8, 9).

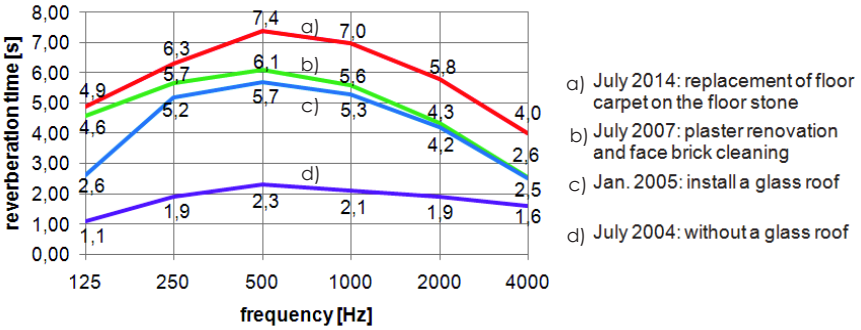
Rys. 8. Szklane przekrycia dziedzińców Gmachu Głównego Politechniki Gdańskiej [10]

Fig. 8. Glazing roofs over Gdańsk University of Technology's main building courtyards [10]

Rys. 9. Widok dziedzińca im. Fahrenheita (fot. autor)

Fig. 9. A view of the Fahrenheit Courtyard (photo by author)

Dziedzińce podlegają dalszym pracom renowacyjnym, poprawiającym ich walor reprezentacyjny. Polegają one na odtworzeniu pierwotnej dyspozycji materiałów wykończeniowych, tj. uzupełnieniach cegły licowej, naprawie kamiennych elementów elewacji, renowacji tynku itp. Ostatni etap prac polegał na położeniu kamiennej posadzki, co spowodowało dalsze pogorszenie warunków akustycznych dziedzińców. Po kolejnych etapach prac czas pogłosu wzrastał od ok. 2,5 s i obecnie sięga 7,5 s, podczas gdy zalecana wartość sprzyjająca użytkowej funkcji pomieszczenia wynosi co najwyżej 2,0-2,5 s (rys. 10). Główną przyczyną tak znacznej pogłosowości dziedzińców jest układ dwóch dużych powierzchni w znikomym stopniu pochłaniających i rozpraszających dźwięk, usytuowanych w dużej odległości naprzeciw siebie, tj. kamiennej posadzki i szklanego sufitu.



Rys. 10. Czas pogłosu dziedzińca im. Fahrenheita na kolejnych etapach prac wykończeniowych. Pobudzenie pomieszczenia: strzał pistoletowy [2, 3]

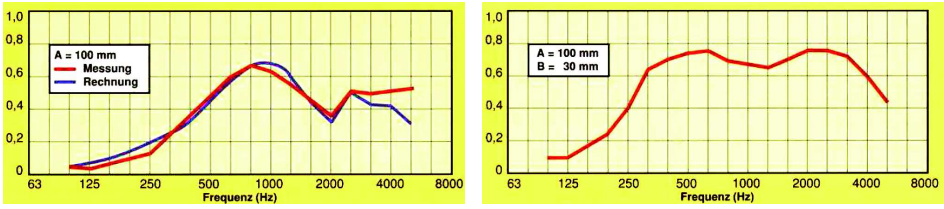
Fig. 10. The Fahrenheit Courtyard reverberation time after successive renovation stages. Room excited with a pistol shot [2, 3]

4.3. KROKI ZARADCZE

Dziedzińce objęte są nadzorem konserwatorskim, ponadto są wykorzystywane jako dydaktyczne ekperymentaria fizyczne – obecnie w dziedzińcu im. Heveliusza funkcjonuje 26-metrowe wahadło Foucaulta. Koncepcja wytłumienia dziedzińców powinna zatem uwzględniać zachowanie ich waloru historycznego oraz możliwość organizowania tam także innych pokazowych demonstracji fizycznych, wykorzystujących unikatową okoliczność, jaką jest wielka kubatura i duża wysokość pomieszczeń. Tak rozumiane wymogi konserwatorskie i użytkowe ograniczają możliwość wytłumienia dziedzińców w sposób praktykowany w pomieszczeniach, tj. za pomocą materiałów dźwiękochłonnych ogólnego przeznaczenia umieszczanych na ścianach lub suficie czy przez podział przestrzeni dziedzińców z użyciem sufitu podwieszonego, zawieszanie ustrojów akustycznych nad obszarem przebywania osób itp.

Sprzyjającą okolicznością, pozwalającą podjąć skuteczne kroki zaradcze, jest duża powierzchnia przeszkleń na suficie i wewnętrznych ścianach dziedzińców (ok. 35% całkowitej powierzchni wewnętrznej). Powierzchnie te są osłonięte przed wpływami atmosferycznymi, co umożliwia umocowanie na nich folii mikroperforowanej. Jest to w pełni przezroczysty materiał o grubości folii spożywczej, rozpinany w odległości kilku cm od podłoża, w tym przypadku od szyby, który wraz z warstwą powietrza za folią tworzy silnie dźwiękochłonny ustrój akustyczny. Folia mikroperforowana jest nowoczesnym materiałem, wysoko zaawansowanym technologicznie (w zależności od typu folii od 250 000 do 500 000 mikrootworów/m^2), od niedawna obecnym na rynku. Folia jest prawie niewidoczna, zaś mocujące ją elementy są dyskretne pod względem wizualnym, co pozwala mieć nadzieję na akceptację tego rozwiązania przez konserwatora zabytków.

Koncepcja wytłumienia dziedzińców przewiduje rozpięcie arkuszy folii pod szklanym dachem z nawiązaniem do istniejących podziałów dachu. W zależności od założonego stopnia wytłumienia dziedzińców należy użyć jednej lub dwóch warstw folii oddalonych od siebie o ok. 3 cm, rozpiętych w odl. ok. 10 cm od tafli szklanych. Współczynnik pochłaniania dźwięku a(f) tak utworzonego ustroju akustycznego przedstawiono na rysunku 11.

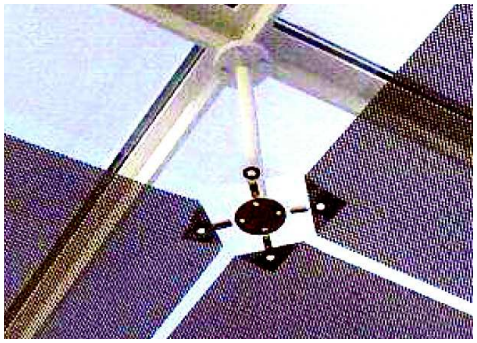


a) b)

Rys. 11. Charakterystyka częstotliwościowa współczynnika pochłaniania dźwięku przez jeden arkusz folii mikroperforowanej, umieszczony w odl. 100 mm od podłoża (a) i przez dwa arkusze, umieszczone w odl. 100 mm + 30 mm (b). Parametry folii: grubość: 0,18 mm, 500 000 otworów Ø 0,1 mm/m^2, stopień perforacji: 1% [7]

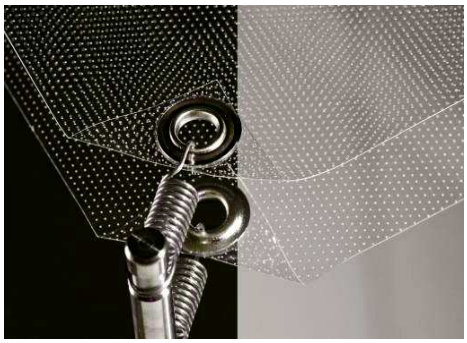
Fig. 11. The sound absorption frequency characteristic for the microperforated foil stretched at a distance of 10 cm (a) and two sheets stretched at a distance of 10 cm + 3 cm (b) from glass pane. Film parameters: thickness 0.18 mm; 500,000 Ø0.1 mm holes per m^2; perforation rate 1% [7]

Dla porównania wartość a(f) szyb tworzących sufit (płyty szklane o grubości 8 i 10 mm) nie przekracza 0,05-0,10. Sposób mocowania folii pokazano na rysunku 12 i 13. Ze względu na dużą powierzchnię sufitu i dużą wysokość pomieszczenia wytłumienie sufitu folią mikroperforowaną daje największy efekt akustyczny i powinno być realizowane w pierwszej kolejności (rys. 14).



Rys. 12. Przykładowy sposób mocowanic folii mikroperforowanej w odległośc ok. 10 cm pod szklanym dachem [7]

Fig. 12. Example of fixing microperforated foil approx. 10 cm under the glass roof [7]



Rys. 13. Detal mocowania dwóch warstw folii mikroperforowanej, odległość między warstwami ok. 3 cm [11]

Fig. 13. Detail of fixing two layers of microperforated foil, the distance between layers approx. 3 cm [11]

Rys. 14. Kolebka i wezgłowie szklanego przekrycia dziedzińców, przewidzianego do pokrycia folią mikroperforowaną [5]

Fig. 14. Cradle and headboard of glass roof over courtyards, intended to cover with the microperforated foil[5]

Rys. 15. Otwór okienny dziedzińca w stanie aktualnym i po proponowanym zainstalowaniu przezroczystej folii mikroperforowanej (wizualizacja). Folia jest rozpięta w odl. ok. 15 cm od szyby okiennej (fot. autor)

Fig. 15. Window opening of the courtyard up to date and after the proposed installation of a microperforated foil (visualization). The foil is stretched approx. 15 cm from the window pane (photo by author)

Ważnym krokiem wspomagającym wytłumienie sufitu jest umieszczenie folii w otworach okiennych. Sprzyja temu duża liczba i duża głębokość otworów okiennych – łączna powierzchnia okien wynosi 384 m^2, zaś odległość między licem ściany a oknem wynosi ok. 20 cm (rys. 15). Umożliwia to rozpięcie w otworze okiennym pojedynczej lub podwójnej warstwy folii w odległości od szyby zapewniającej optymalny efekt akustyczny.

4.4. OBLICZENIA AKUSTYCZNE

Wpływ folii mikroperforowanej na czas pogłosu można oszacować z użyciem wzoru Sabine'a (1) (obliczenia dotyczą pasma oktawowego o częstotliwości środkowej 1000 Hz):

$$T = 0{,}161\ V/A \tag{1}$$

gdzie T oznacza czas pogłosu dziedzińca po zastosowaniu folii, V = 13423 m^3 jego kubaturę, zaś A całkowitą chłonność akustyczną dziedzińca z uwzględnieniem wpływu folii. Wartość A można obliczyć ze wzoru (2):

$$A = A_0 + \Delta A \tag{2}$$

gdzie A_0 oznacza chłonność akustyczną dziedzińca w stanie aktualnym:

$$A_0 = 0{,}161\ V/T_0 \tag{3}$$

zaś $T_0 \approx 7{,}0$ s – aktualny czas pogłosu dziedzińca (patrz rys. 10). ΔA odpowiada wzrostowi chłonności akustycznej po zastosowaniu folii

$$\Delta A = (a_f - a_s)S \tag{4}$$

gdzie a_f = 0,85 i a_s = 0,1 są współczynnikami pochłaniania dźwięku odpowiednio folii (patrz rys. 7) i szyby, zaś S jest powierzchnią przeszkleń pokrytych folią. Ostatecznie gdy zastosuje się folię na szklanym dachu i na oknach (S_1 = 1079 m^2) lub tylko na szklanym dachu (S_2 = 695 m^2), wzór (1) przyjmuje odpowiednio postać (5) lub (6):

$$T_1 = 0{,}161V/[A_o + S_1(a_f - a_s)] \tag{5}$$

$$T_2 = 0{,}161V/[A_o + S_2(a_f - a_s)] \tag{6}$$

Wzory (5) i (6) dają wartości T_1 = 1,94 s i T_2 = 2,60 s. Wyidealizowanie założeń tych wzorów przewidujących całkowite rozproszenie pola akustycznego powoduje, że wartości T_1 i T_2 należy skorygować w górę, ale nawet wtedy otrzymany wynik jest zaskakująco optymistyczny.

Użyte wzory pozwalają na szybkie oszacowanie akustycznego wpływu folii kosztem ograniczonej dokładności wyniku. Dokładność ta maleje wraz ze wzrostem średniego współczynnika pochłaniania dźwięku dziedzińców przed i po użyciu folii a_o i a_1 (7), (8) [1].

$$a_o = 0{,}161V/\ T_o\ S_o \tag{7}$$

$$a_1 = 0{,}161V/\ T_1\ S_o \tag{8}$$

Po podstawieniu S_o = 3096 m^2 (całkowita powierzchnia wewnętrzna dziedzińca) oraz wyżej podanych wartości liczbowych V, T_0, T_1 otrzymano $a_o = 0{,}1$ i $a_1 = 0{,}36$. Przy tych wartościach wynik uzyskany z wykorzystaniem wzoru Sabi-

ne'a (1) różni się mniej niż odpowiednio o 5% i 24% od wyniku uzyskanego za pomocą wzoru Eyringa, używanego w obliczeniach projektowych [1]. Na etapie koncepcji dokładność taką można uznać za wystarczającą.

5. UWAGI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono wybrane problemy z zakresu akustyki wnętrz, występujące przy renowacji dużych pomieszczeń znajdujących się w obiektach zabytkowych. Przedstawiony przykład pokazuje, jak pozornie neutralny zabieg architektoniczny, jakim jest zamknięcie półotwartego wnętrza szklanym dachem, może radykalnie pogorszyć komfort jego użytkowania.

W rewaloryzowanych obiektach zabytkowych zwykle występują też inne problemy z zakresu akustyki, o nierzadko szerszym zakresie robót i większych kosztach, co wynika ze stanu technicznego starej substancji budowlanej. Mowa tu np. o izolacyjności akustycznej ścian, stropów i stolarki otworowej, zakłóceniach instalacyjnych (wentylacja, dźwigi, sieć grzewcza i wod.-kan.), odporności obiektu na drgania transportowe przenoszone gruntem itp. Prawidłowe rozwiązanie tych problemów w zgodzie z rygorami sztuki konserwatorskiej mocno wpływa na możliwość dalszego użytkowania remontowanych obiektów w najbardziej pożądany sposób, tj. z zachowaniem ich pierwotnej funkcji.

LITERATURA

[1] Kulowski A., 2011. Akustyka sal – Zalecenia projektowe dla architektów. Wyd. Politechniki Gdańskiej.

[2] Kulowski A., Kamisiński T., 2012. Wpływ szklanych przekryć na akustykę wielkich wnętrz na przykładzie dziedzińców Politechniki Gdańskiej. XIX Konferencja Inżynierii Akustycznej i Biomedycznej Zakopane.

[3] Sobieraj I.E., 2005. Raport z pomiarów (opr. niepublikowane).

[4] http://photography-aerial.com/aerial-photography/the-british-museum-london/#

[5] http://www.infoarchitekta.pl/firmy/A/22-agc-flat-glass-polska.html (dostęp: 13.06.2016).

[6] http://www.radiobielsko.pl/foto/20140509/1399641065-3234956809.jpg (dostęp: 13.06.2016).
http://muzeum.bielsko.pl/images/galeria/47018-patio_IMG_2492-s.jpg (dostęp: 13.06.2016).
http://www.a-ronet.pl/index.php?mod = nagroda&n_id = 2180 (dostęp: 13.06.2016).

[7] http://www.rematec.com.pl/uploads/files/microsorber.pdf (dostęp:13.06.2016).
https://files1.structurae.de/files/photos/1/20090528/dsc05425_shiftn.jpg (dostęp: 13.06.2016).

[8] http://www.zamek-gniew.pl/uploads/image/IMG_3336.jpg (dostęp: 13.06.2016).

[9] https://i.ytimg.com/vi/GzRg5sltj_A/maxresdefault.jpg (dostęp: 13.06.2016).
http://placwilsona.blox.pl/resource/fort9.jpg (13.06.2016).

[10] https://www.google.pl/maps/ (dostęp: 13.06.2016).

[11] https://www.pinterest.com/gerdakaasik/glass-walls/ (dostęp: 13.06.2016).

[12] www.muzeum-ak.pl (dostęp: 13.06.2016).

WPŁYW SUFITU PRZESZKLONEGO NA AKUSTYKĘ WNĘTRZ ZABYTKOWYCH

STRESZCZENIE. W pracy omówiono niekorzystne zjawiska akustyczne, występujące w półotwartych wnętrzach (dziedzińce, podwórza) po ich osłonięciu szklanym dachem. Szczególnie niekorzystnym zjawiskiem jest hałas pogłosowy, który prowadzi do degradacji funkcji użytkowych powstałego w ten sposób pomieszczenia. Polega ona na drastycznym zmniejszeniu zrozumiałości mowy, utracie naturalności brzmienia muzyki, problemach z nagłośnieniem, a także zaburzeniach w funkcjonowaniu Dźwiękowego Systemu Ostrzegawczego.

Praca jest poświęcona wnętrzom zabytkowym, w których wymogi konserwatorskie znacznie ograniczają możliwość zmniejszenia hałasu pogłosowego za pomocą materiałów dźwiękochłonnych ogólnego przeznaczenia. Przedstawiono koncepcję zastosowania folii mikroperforowanej, będącej nowoczesnym, wysoko zaawansowanym technologicznie materiałem dźwiękochłonnym, od niedawna obecnym na rynku. Jest ona przezroczysta, a przez to prawie niewidoczna, zaś mocujące ją elementy są dyskretne pod względem wizualnym. W związku ze swoją wysoką efektywnością akustyczną, a jednocześnie pomijalnym wpływem na wyraz architektoniczny wnętrza folia mikroperforowana jest materiałem szczególnie przydatnym do omawianego celu.

Słowa kluczowe: wnętrza zabytkowe, rewaloryzacja, sufit szklany, hałas pogłosowy, folia mikroperforowana

IMPACT OF THE GLAZED ROOF ON ACOUSTICS OF HISTORIC INTERIORS

SUMMARY. The paper discusses the adverse acoustic phenomena occurring in the semi-open interiors (courtyards, yards) covered with a glass roof. Particularly negative is the reverberation noise, which leads to the degradation of the utility functions of the resulting spaces. It involves the drastically reducing the intelligibility of speech, loss of natural sounding of music, problems with the sound system, as well as disturbances in the functioning of the sound system for emergency purposes.

The work refers to historic interiors, where preservation requirements significantly limit the possibility to reduce reverberation noise by means of sound-absorbing materials of general use. The work describes the concept of the use of micro-perforated foil which is a modern, technologically advanced sound-absorbing material, only recently present on the market. Because of its high acoustical efficiency and negligible effect on the expression of architectural design, micro-perforated foil is particularly suitable for the purpose in question.

Key words: historic interiors, restoration, glazed roof, reverberation noise, microperforated foil