

## 5. Podsumowanie

Stale zaostrzane przepisy dotyczące efektywności energetycznej przegród zakładają coraz niższe wartości współczynnika przenikania ciepła, co wymusza częstokroć zastosowanie kilku warstw termoizolacji. System DUO umożliwia budowę stropodachu zielonego, którego współczynnik przenikania ciepła może być niższy od wymagań minimalnych. Zastosowanie odwróconego układu warstw pozwala ponadto obniżyć temperaturę warstwy uszczelniającej o ponad 56%. W ten sposób ryzyko szkód związanych z krótko- i długookresowymi, znacznymi wahaniami temperatury jest znacznie niższe, a dzięki warstwie termoizolacyjnej uszczelnienie jest dodatkowo chronione przed promieniowaniem UV czy też uszkodzeniami mechanicznymi. Warto również zauważyć, że w przypadku stropodachów DUO oraz PLUS temperatura warstw uszczelniających nigdy nie spadła poniżej zera, co należy postrzegać za istotną zaletę tych rozwiązań.

Dachy zielone przyczyniają się również do ograniczania emisji gazów cieplarnianych. Obok pochłaniania dwutlenku węgla w procesie fotosyntezy wpływają również, analogicznie do tzw. dachów chłodnych [3], na mikroklimat wewnętrzny, przez obniżenie temperatury w budynku oraz pozwalają ograniczyć zużycie energii na potrzeby klimatyzacji.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] DAFA DZ 1.01, Wytyczne do projektowania, wykonywania i pielęgnacji dachów zielonych – wytyczne dla dachów zielonych, DAFA, 2015
- [2] Monczyński B., ABC dachów odwróconych, Inżynier Budownictwa, 10/2017, str. 44–48
- [3] Monczyński B., Ksist B., Komu w Polsce są potrzebne chłodne dachy, Inżynier Budownictwa, 2/2017, str. 96–100
- [4] Rokiel M., Hydroizolacje w budownictwie. Wybrane zagadnienia w praktyce, Dom Wydawniczy MEDIUM, Warszawa, 2009
- [5] Rosenzweig C., Gaffin S., Parshall L., Green Roofs in the New York Metropolitan Region: Research Report, Columbia University Center for Climate Systems Research and NASA Goddard Institute for Space Studies, New York, 2006
- [5] Walawender J. P., Miejska wyspa ciepła – negatywne skutki urbanizacji oraz możliwości przeciwdziałania (na przykładzie Krakowa), 2015, serwis internetowy Zielona Infrastruktura (<http://zielonainfrastruktura.pl>), dostęp: 03.12.2017
- [6] Walawender J.P., Wpływ dachów zielonych na warunki klimatyczne w mieście, 2015, portal Zielona Infrastruktura (<http://zielonainfrastruktura.pl>), dostęp: 03.12.2017

# Wpływ lunet na stan naprężeń sklepień kolebkowych historycznych budynków

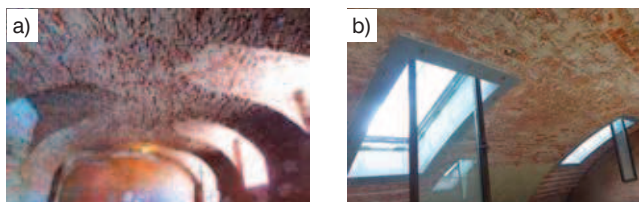
Prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz, dr inż. Rafał Nowak, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

## 1. Wprowadzenie

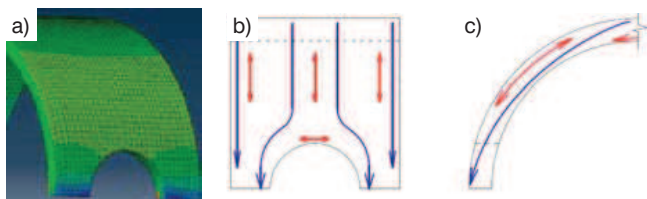
Ceglane sklepienia w obiektach historycznych po wieloletniej eksploatacji często budzą obawy, odnośnie ich nośności i możliwości dalszego bezpiecznego użytkowania. Dotyczy to zwłaszcza sklepień w remontowanych obiektach zabytkowych lub obiektach poddanych modernizacji z uwagi na zmianę sposobu użytkowania. Uszkodzenie lub stan awaryjny sklepień występuje najczęściej ze względu na poziome przemieszczenia wezłowski sklepień, co z kolei powodowane jest przez nierównoważone siły rozporu lub nierównomierne pionowe osiadanie ścian czy filarów nośnych. Przyczyną uszkodzeń może być również fakt, że wiele sklepień wybudowanych zostało w sposób nie w pełni racjonalny pod względem statycznym, jak również z powodu niewłaściwego ich obciążenia [1, 2, 3]. Warto nadmienić, że ilość prac związanych z analizą zachowania się oraz sposobów napraw zabytkowych sklepień jest stosunkowo mała, a ich badanie oraz rozwiązania konstrukcyjne nie cieszą się zbyt dużym zainteresowaniem [2].

## 2. Sklepienia z lunetami

Najbardziej wyťažonymi strefami sklepień są wezłowania, czyli płaszczyzny oparcia sklepień. W płaszczyznach tych poza ściskaniem w kierunku prostopadłym do spoin wspornych muru występują naprężenia ścinające wywołane siłami rozporu. Istotnym czynnikiem wpływającym na poziom wyężenia konstrukcji sklepienia są lunety występujące w postaci poprzecznej kolebki przenikającej się z kolebką sklepienia głównego w celu umożliwienia wykonania okien lub drzwi



**Rys. 1.** Widok sklepienia ceglanoego z lunetami (a) i nowo wykonanymi otworami okiennymi (b)



**Rys. 2.** Sklepienie walcowe z otworem w strefie wezłowa: fragment schematu obliczeniowego MES (a), rozkład naprężeń na powierzchni grzbietowej (b), rozkład naprężeń w przekrojach poprzecznych poza otworem (c)

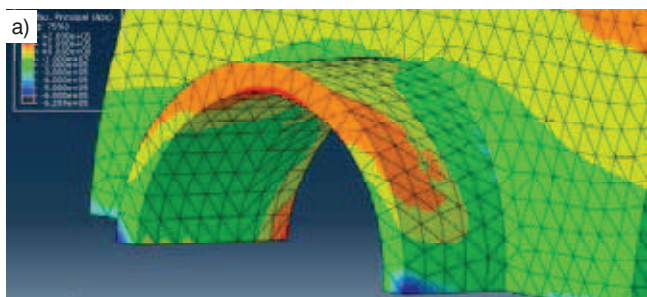
w ścianie powyżej wezłowa sklepienia (rys. 1a). W okresie renesansu sklepienia z lunetami były często stosowane, aby wprowadzić światło do wnętrza, urozmaicić je lub bardziej swobodnie kształtować przestrzeń. Obserwacje wykazują, że w strefie lunet występuje najwięcej uszkodzeń sklepień w postaci spękań lub degradacji muru. Niekiedy podczas adaptacji historycznych budynków do obecnych wymogów, istnieje konieczność wykonania nowych otworów okiennych do naświetlenia wnętrza zadaszonego sklepieniem. Otwory te najczęściej usytuowane są powyżej wezłowa sklepienia, co prowadzi do jego osłabienia (rys. 1b).

Ze względu na brak danych w literaturze technicznej co do współpracy lunet ze sklepieniami autorzy artykułu przeprowadzili symulacje numeryczne. Ponieważ sklepienia o skomplikowanym kształcie charakteryzują się wysokim stopniem statycznej niewyznaczalności, do ich zaawansowanej analizy wykorzystuje się obecnie MES. Analizie poddano sklepienia walcowe modelowane w programie ABAQUS. Do symulacji za pomocą skończonych elementów bryłowych stosowano modele typu 3D. Ponieważ celem obliczeń numerycznych było ustalenie dystrybucji naprężeń głównych na powierzchniach podniebienia i grzbietu sklepień zastosowano rzadki podział z wykorzystaniem izoparametrycznych elementów skończonych.

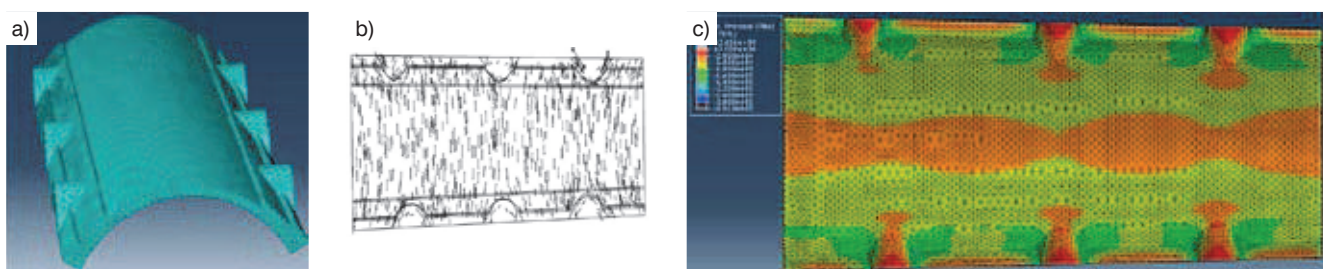
Połączenie między sklepieniem a dźwigającymi je ścianami założono jako sztywne. W ogólnym przypadku rozpatrywano niesymetryczne obciążenie względem przęsła sklepienia, w związku z czym konieczne było wymodelowanie pełnego sklepienia. Poniżej przytoczono analizę, uwzględniając tylko wpływ ciężaru własnego. Na początku przeanalizowano wpływ otworów o kształcie półkulistym na stan naprężeń sklepienia, bez lunet (rys. 2).

Ustalono, że obecność otworów wywołuje redystrybucję sił ściskających wzdłuż osi sklepienia. Naprężenia ściskające w płaszczyźnie wezłowa rosną proporcjonalnie w polu przekroju osłabienia go otworami, natomiast ich dystrybucja w tej płaszczyźnie jest nierównomierna z koncentracją w pobliżu otworów. Ponadto gwałtowna zmiana kierunku linii ciśnień w sąsiednich równoległych poprzecznych przekrojach sklepienia w obrębie otworu powoduje powstanie w jego grzbiecie naprężeń rozciągających, działających wzdłuż spoin wspornych muru (rys. 2b). Z uwagi na niską wytrzymałość muru na rozciąganie w tym kierunku [4] naprężenia te mogą wywołać spękanie sklepienia w kierunku prostopadłym do grzbietu otworu. Ponadto w poprzecznych przekrojach sklepienia występują strefy rozciągane prostopadle do spoin wspornych, zlokalizowane przy jego zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni (rys. 2c). Strefy te praktycznie nie biorą udziału w przeniesieniu obciążenia ze względu na bardzo niską wytrzymałość muru na rozciąganie w poprzek spoin wspornych [4].

Na rysunku 3 przytoczono wybrane wyniki obliczeń sklepienia z lunetą o kształcie walcowym występującą poza zewnętrzną krawędź jego wezłowa, lecz opartą na ścianie. Podobnie jak w poprzednim przykładzie rozkład naprężeń ściskających (linii ciśnień) w poszczególnych równoległych przekrojach wzdłuż osi sklepienia jest zbliżony – występuje zmiana ich kierunku w obrębie lunety. Istotna różnica polega na tym, że naprężenia ściskające przekazywane są zarówno



**Rys. 3.** Sklepienie walcowe z lunetą opartą na ścianie: fragment schematu obliczeniowego MES (a), rozkład naprężeń na powierzchni grzbietowej sklepienia i lunety (b), rozkład naprężeń w przekrojach poprzecznych sklepienia i lunety (c)



**Rys. 4.** Stan naprężeń sklepienia walcowego z lunetami: model obliczeniowy MES (a), mapa głównych naprężeń ściskających na grzbiecie sklepienia (b), mapa głównych naprężeń na podniebieniu sklepienia i lunety (c)

na węzłowie głównego sklepienia, jak i na węzłowie sklepienia lunety. Natomiast koncentracja naprężeń rozciągających wzdłuż spoin wspornych powstaje nie w głównym sklepieniu w miejscu jego przecięcia lunetą, lecz w górnej części lunety (rys. 3b).

W budynkach historycznych najczęściej stosowano lunety z czołami usytuowanymi w obrębie krawędzi zewnętrznej węzłowania sklepienia (rys. 4a). W przypadku tym luneta pracuje jako samodzielne sklepienia oparte tylko na głównym sklepieniu. Rozkład głównych naprężeń ściskających w sklepieniu (rys. 4b) jest podobny jak w sklepieniu z otworami bez lunet (rys. 2b). Natomiast naprężenia ściskające w płaszczyźnie węzłowania, z uwagi na dodatkowe obciążenie opartych na sklepieniu lunet, są większe w porównaniu do sklepienia z otworami jak na rysunku 2. W związku z tym przyporządkowane strefy takich sklepień wykonywano niekiedy grubsze w porównaniu z ich górną częścią (rys. 4a). Zarówno na podniebieniu rozpatrywanego sklepienia, jak i na podniebieniu lunet w ich górnej części, występują naprężenia rozciągające w kierunku prostopadłym do spoin wspornych (rys. 4c).

Rzadziej spotykanym przypadkiem jest sytuacja, w której przy dużych rozmiarach lunet ich kolebki przenikają się z kolebką sklepienia głównego w jego najwyższej strefie (rys. 1a). Powoduje to znaczące zwiększanie obciążenia pionowego na odcinki sklepienia między lunetami, zwłaszcza w strefach ich węzłowania. Zwiększa się natomiast sztywność gięta sklepienia głównego, gdyż kolebki z wydłużonym grzbietem mogą być potraktowane jako żebra o kształcie powłokowym usztywniające sklepienie główne. Sklepienia te są mniej wrażliwe na nierównomierne obciążenie, przy którym w strefach grzbietowych lub podniebienia mogą powstać duże naprężenia rozciągające w kierunku minimalnej wytrzymałości muru na rozciąganie, czyli prostopadle do spoin wspornych [4]. Warto nadmienić, że w strefie połączenia kolebek lunet z głównym sklepieniem powstają siły rozporowe od ciężaru lunet, działające wzdłuż osi podłużnej głównego sklepienia, czyli wzdłuż jego spoin wspornych. W związku z tym mur sklepienia głównego między lunetami pracuje w dwuosowym stanie naprężeń – ściskania wzdłuż spoin wspornych wywołanego rozporami lunet

oraz ściskania w poprzek spoin wspornych zgodnie z przebiegiem linii ciśnień od ciężaru własnego sklepienia głównego wraz z lunetami. Taki stan naprężeń jest korzystny, ponieważ według kryteriów wytrzymałości muru pracującego w złożonym stanie naprężeń dwuosowe ściskanie zwiększa nośność muru w porównaniu z jednoosiowym ściskaniem [5].

### 3. Podsumowanie

Wykonana analiza obliczeniowa jest niezbędna, lecz nie wystarczająca w przypadku konieczności wzmocnień i remontów sklepień zabytkowych z lunetami. Wspomaga ona decyzję o bardziej efektywne i adekwatne strategię lub środki wzmocnienia. Natomiast niezbędna jest dodatkowa wiedza o rzeczywistych cechach mechanicznych muru sklepień po wieloletniej eksploatacji jako materiału konstrukcyjnego, o historii ich eksploatacji i o wielu innych czynnikach [2]. Na przykład do oceny nośności sklepień z lunetami ze względu na ich złożony stan naprężeń niezbędne są właściwe kryteria wytrzymałościowe uwzględniające cechy anizotropowe muru. Ponadto, z punktu widzenia konserwatorskiego, istotnym może być również zachowanie autentyczności naprawianych sklepień. Uwzględnienie wpływu tych czynników na nośność sklepień z lunetami stanowi przedmiot dalszych badań autorów.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Borusiewicz W., Konserwacja zabytków budownictwa murowego, Arkady, Warszawa, 1985
- [2] Janowski Z., Hojdys Ł., Krajewski P., Sklepienia zabytkowe – klasyfikacja, ocena stanu technicznego i nośności, naprawy i wzmocnienia, XXII Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 2007
- [3] Jasięko I., Łodygowski T., Rapp P., Naprawa, konserwacja i wzmocnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2006
- [4] PN-EN 1996-1-1+A1:2013-05/NA: 2014-10 EUROKOD 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla niezbrojonych i zbrojonych konstrukcji murowych
- [5] Małyszko L., Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uwzględnieniem anizotropii, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko Mazurskiego, Olsztyn, 2005

## Jubileusz Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy

Z dumą i wielką radością pragniemy zaprosić Państwa na uroczyste obchody Jubileuszu 50-lecia Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska. Wydział jest kontynuatorem naukowej, badawczej i dydaktycznej działalności Wydziału Budownictwa Lądowego powstałego w 1967 roku w Wyższej Szkole Inżynierskiej.

**Uroczysta Gala Jubileuszowa odbędzie się w dniu 5 kwietnia 2018 roku o godzinie 15.30 w Audytorium Novum Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Al. prof. S. Kaliskiego 7.**

W dniu 6 kwietnia 2018 roku odbędzie się Konferencja Absolwentów „Wyzwania i innowacje w działalności inżynierskiej”. Tematyka Konferencji dotyczy innowacyjnych rozwiązań inżynierskich, najważniejszych projektów i najciekawszych realizacji obiektów budowlanych, które są dziełami Absolwentów naszego Wydziału. Bardzo gorąco zachęcamy wszystkich Absolwentów do czynnego udziału w Konferencji i przygotowanie referatów, które wygłoszone zostaną podczas Konferencji.

Zapraszamy wszystkich Absolwentów, Pracowników i Studentów, którzy przez ostatnie 50 lat tworzyli historię naszego Wydziału.

dr hab. inż. Jan Kempa, prof. UTP, Dziekan Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Informacje: <http://wbis.utp.edu.pl/> w zakładce „Jubileusz 50-lecia”, kontakt: [jubileuszwbais@utp.edu.pl](mailto:jubileuszwbais@utp.edu.pl)