

## KONSERWACJA KONSTRUKCYJNA HISTORYCZNYCH SKLEPIEŃ Z WYKORZYSTANIEM INNOWACYJNYCH MATERIAŁÓW

Łukasz BEDNARZ\*, Alicja HOYENSKI\*\*, Gabriela WOJCIECHOWSKA\*\*

\* Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

\*\* Wydział Architektury

Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

E-mail: gabriela.wojciechowska@pwr.edu.pl

**Słowa kluczowe:** sklepienia historyczne, materiały kompozytowe, złącza podatne, modele HBIM, analiza MES

### ABSTRAKT

Historyczne sklepienia jako jedne z najbardziej odpowiedzialnych konstrukcji pod wpływem działania niekorzystnych czynników mogą tracić swoje właściwości wytrzymałościowe i estetyczne. Często z powodów, takich jak degradacja materiałów, zmiany obciążeń, zmiana stosunków wodno-gruntowych czy potrzeba dostosowania do współczesnych standardów bezpieczeństwa wymagają działań wzmacniających. Konserwacja sklepień nie rzadko wymaga połączenia technik konserwacji konstrukcyjnej i architektonicznej. Wzmocnienia muszą być planowane i przeprowadzane z poszanowaniem dla wartości historycznych, naukowych i architektonicznych tych elementów. Projektowanie i dobór materiałów wzmacniających powinien wynikać z dokładnej oceny stanu technicznego, analizy obciążeń i rozkładu naprężeń. Do najczęściej spotykanych metod stabilizowania stanu technicznego oraz wzmacniania sklepień należy stosowanie m.in. systemów ściągów, wklejanych stalowych prętów lub blach, iniekcje oraz coraz bardziej popularnych, ale nadal uważanych za innowacyjne materiałów kompozytowych w postaci siatek, prętów, sznurów, mat i taśm systemów typu FRP (Fiber Reinforced Polymers) lub FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) oraz polimerowych złączy podatnych [1-3]. Wzmocnianie sklepień za pomocą tych nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych o wysokiej wytrzymałości i elastyczności zapewnia zwiększenie stabilności i trwałości sklepień.

Przed wybraniem metody wzmocnienia i konserwacji należy przeprowadzić badania określające stan techniczny sklepienia. Badania

te należy poprzedzić wykonaniem dokumentacji rysunkowej (metrycznej), w której oznaczone będą uszkodzenia konstrukcyjne np. występujące zarysowania i ubytki materiałowe. Dokumentacja powinna zawierać szczegółowe rysunki architektoniczne, fotografie, ewentualnie opracowania fotogrametryczne lub/i skanowanie laserowe 3D w celu stworzenia cyfrowych modeli konstrukcji. Modele te mogą zawierać dane geometryczne poszerzone o metadane dotyczące parametrów materiałowych, architektury i przemian obiektu – w przypadku opracowywania lub korzystania z gotowej dokumentacji HBIM (Historic Building Information Modeling).

W dalszej kolejności należy przeprowadzić, o ile jest to możliwe w sposób jak najmniej ingerujący w konstrukcję i jej materiał, badania materiałowe, w tym badania wytrzymałościowe takie jak: wytrzymałość na ściskanie i odrywanie, analizy chemiczne i fizyczne, składu materiałów itp. Bardzo przydatnymi na tym etapie postępowania wydają się zwłaszcza metody nieniszczące (NDT – Non Destructive Test).

Na podstawie uzyskanych wyników należy dobrać odpowiedni model do obliczeń (statycznych lub dynamicznych) [4]. W sklepieniach o konstrukcji ceglanej, kamiennej, betonowej lub mieszanej zalecane jest wykonanie analizy konstrukcyjnej. Z uwagi na trudną do ujęcia w tradycyjnych modelach obliczeniowych geometrię sklepień pomocnymi w tym zakresie są modele MES (Metoda Elementów Skończonych). Wykorzystanie MES pozwala na przeprowadzenie szczegółowej analizy elementów pod wpływem oddziałujących na nie obciążeń (istniejących i projektowanych). Modele MES są cennymi narzędziami do analizy i projektowania wzmocnień konstrukcyjnych za pomocą różnych rodzajów materiałów. Modele te wykorzystują metody numeryczne do symulacji zachowania konstrukcji i oceny efektywności wykorzystanego wzmocnienia. Pozwalają również na symulację różnych wariantów obciążenia i potencjalnych awarii, takich jak pękanie, rozwarstwianie lub nadmierne naprężenia.

Nowoczesne materiały kompozytowe, są lekkie i mają wysoką wytrzymałość na rozciąganie, dzięki czemu nadają się do zwiększania nośności sklepień bez znacznego dodatkowego ciężaru. Są również elastyczne, co pozwala na dostosowanie się do ewentualnych „ruchów” i deformacji sklepienia. To jest szczególnie istotne w przypadku obiektów zlokalizowanych na obszarach o podwyższonej aktywności sejsmicznej, ale również w centrach historycznych miast, w których funkcjonuje wzmoczony transport kołowy. Materiały te są odporne na korozję, co zapewnia długoterminową trwałość i minimalizuje ryzyko pogorszenia się parametrów wytrzymałościowych w miarę upływu czasu.

Wzmacnianie konstrukcji historycznych innowacyjnymi materiałami kompozytowymi jest zgodne z doktryną konserwatorską – jest mało inwazyjne i odwracalne (przy właściwym projektowaniu i prawidłowym wykonaniu).

Systemy FRCM, wykorzystujące jako matrycę mocująca wzmacniające włókna (węglowe, szklane, bazaltowe, aramidowe, PBO i inne) kompozycje mineralne charakteryzują stosunkowo dobrą paroprzepuszczalnością i nie blokują migracji wilgoci w postaci pary wodnej, co jest bardzo istotne, gdy na sklepieniach, od strony ich podniebienia, wymagających interwencji konstrukcyjnej występują np. freski.

Polimerowe złącza podatne wykorzystuje się do łączenia i wzmocnienia uszkodzonych lub osłabionych elementów sklepień, zarówno w celu zapewnienia stabilności strukturalnej, jak i zachowania integralności historycznej [3].

Po wzmocnieniu sklepień konieczne jest systematyczne ich monitorowanie diagnostyczne [5, 6] dla upewnienia się, czy wzmocnienie jest efektywne i nie ma oznak dalszych uszkodzeń lub degradacji materiałowej.

## LITERATURA

- [1] Ł. Bednarz: *Wybrane materiały stosowane w renowacji zabytkowych murów*, Inżynier Budownictwa, nr 5, 2021, s. 57-60.
- [2] J. Jasieńko, T. Łodygowski, P. Rapp: *Naprawa, konserwacja i wzmacnianie zabytkowych konstrukcji ceglanych*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2006.
- [3] A. Kwiecień: *Polimerowe złącza podatne w konstrukcjach murowych i betonowych*, Wydawnictwo PK, Kraków, 2013.
- [4] J. Scacco, B. Ghiassi, G. Milani, P. Lourenço: *A fast modeling approach for numerical analysis of unreinforced and FRCM reinforced masonry walls under out-of-plane loading*, Composites Part B: Engineering, Vol. 180, 2020. s.107553.
- [5] Ł. Bednarz: *Monitoring diagnostyczny obiektów historycznych*, Oficyna Wydawnicza ATUT - Wrocławskie Wydawnictwo Oświatowe, Wrocław, 2023.
- [6] Ł. Bednarz, D. Bajno, Z. Matkowski, I. Skrzypczak, A. Leśniak: *Elements of Pathway for Quick and Reliable Health Monitoring of Concrete Behavior in Cable Post-Tensioned Concrete Girders*, Materials, Vol. 14 , nr 6, 2021, s. 1-29.