

# Badania i zastosowanie systemów FRGM na bazie włókien węglowych i P.B.O. przy wzmacnianiu konstrukcji historycznych



dr inż.  
**KRZYSZTOF RASZCZYK**  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
ORCID: 0000-0002-0121-0670

W pracy przedstawiono badania własne pierścieni ceglanych wzmocnionych przy użyciu systemów FRGM oraz możliwość zastosowania na obiekcie zabytkowym. Jako przykład aplikacji przedstawiono wzmocnienie górnego pierścienia kopuły północnej Pawilonu Czterech Kopuł we Wrocławiu.

Obiekty historyczne z upływem czasu ulegają częściowej destrukcji, przez co w wielu przypadkach niezbędne jest przeprowadzenie odpowiednich zabiegów wzmacniających. W przypadku obiektów, w których zidentyfikowano liczne pęknięcia, jedną z metod wzmocnienia jest powierzchniowe dodanie powłoki kompozytowej o niewielkiej grubości, zawierającej jedną lub dwie warstwy siatek wzmacniających zatapiających w matrycy mineralnej. Jest to tzw. system FRGM (ang. *Fibre Reinforced Cementitious Matrix*), który jest powszechnie stosowany w międzynarodowych programach badawczych [1-7].

Konstrukcje murowane o geometrii zakrzywionej upraszcza się zazwyczaj do łuku, który może być elementem reprezentatywnym dla pracy statycznej całej konstrukcji. Dla pewnej grupy obiektów reprezentatywnym elementem konstrukcyjnym, który można poddać badaniom doświadczalnym, analizom teoretycznym oraz symulacjom numerycznym, może być również pierścień poddany rozciąganiu z ewentualnym zginaniem i ścinaniem. Wynika to z rozkładu sił wewnętrznych w kopułach, gdzie w dolnych pasmach oraz w dolnym pierścieniu występują siły rozciągające (rys. 1).

W obiektach historycznych wydzielonym myślowo pasmem kopuły jest np. pierścień murowany z cegły pełnej lub kamienia na zaprawie wapiennej. Często w obiektach zabytkowych można było spotkać dodatkowo łańcuchy żelazne lub drewniane przenoszące siły rozciągające. Współczesne pierścienie dolne w konstrukcjach kopuły realizowane są głównie z profili stalowych.

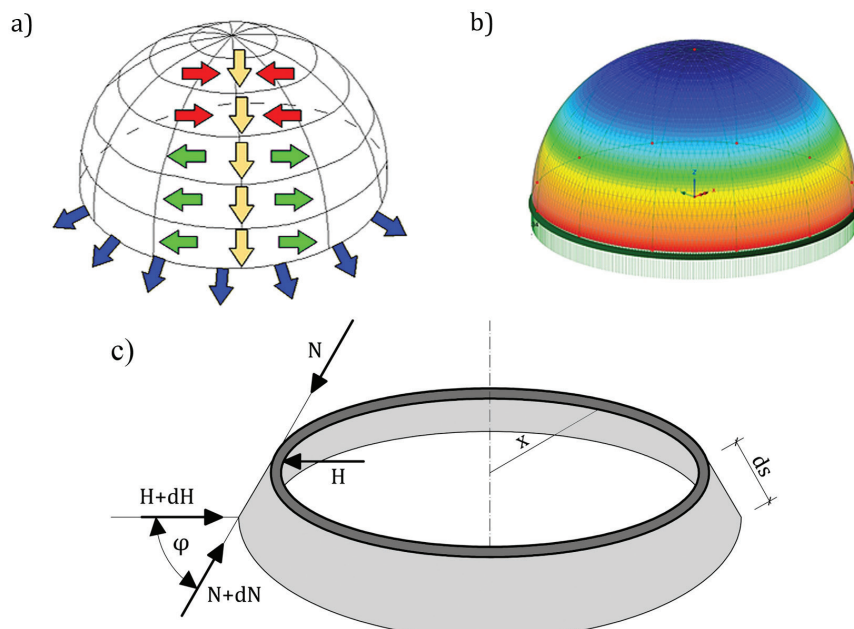
Bezpośrednią metodą oceny skuteczności wzmocnienia obwodowego jest przeprowadzenie badań na modelach rzeczywistych

w laboratorium. Dotychczas nie wykonywano analogicznych badań, które umożliwiłyby ocenę efektywności wzmocnień obwodowych dla pierścieni historycznych.

## Badania własne pierścieni ceglanych

W ramach badań przeprowadzonych w Laboratorium Konstrukcji Budowlanych Politechniki Wrocławskiej wykonano murowane pierścienie ceglane wraz z systemem obciążania od strony wewnętrznej. Modele wykonane z cegły pełnej klasy „15” na zaprawie wapienno-trasowej klasy M5 miały średnicę osiową 3000 mm i wymiary przekroju po-

przecznego 250 x 335 mm. W ramach szerokiego programu badawczego testom poddano 9 modeli (do R1 do R9) wzmocnianych przy użyciu różnych technologii, tj.: R1 – taśma z włókien węglowych, R2 – płaskowniki stalowe, R3 – sploty i liny stalowe, R6 – włókna szklane, R7 – włókna bazaltowe, R8 – włókna węglowe, R9 – włókna P.B.O (poliparafenilen benzobisoxazolu). Część modeli badano dodatkowo w dwóch fazach: bez wzmocnienia (modele R1 do R5) i po zastosowaniu wzmocnienia obwodowego. Część modeli wzmocniono przy użyciu systemu FRGM w oparciu o siatki z włókien węglowych w przypadku modelu R8 i włókien



Rys. 1. Idea badań pierścieni rozciąganych: a) siły wewnętrzne w kopule, b) naprężenia uzyskane w modelu MES, c) siły oddziaływujące na pierścień wyseparowany z kopuły

P.B.O. w przypadku modelu R9, dla których uzyskano najwyższe efektywności wzmocnienia dla systemów FRCM i wyniki tych badań stanowią przedmiot pracy (fot. 1).

Parametry techniczne systemu FRCM przyjęto na podstawie badań materiałowych [8], gdzie badaniom poddano włókna węglowe i włókna P.B.O. Podstawowe parametry techniczne systemów FRCM zestawiono w tabeli (tabela 1.).

Pierścienie obciążano od strony wewnętrznej przy użyciu siłowników hydraulicznych aż do zniszczenia. Podstawowym modelem zniszczenia pierścienia R8 było zerwanie siatki przy wartości sily obciążającej [9] w punkcie nr 1. Pozostała część materiału wzmacniającego nie uległa zniszczeniu (fot. 2.).

Podstawowym modelem zniszczenia pierścienia R9 było zmiżdżenie muru w obszarze punktu nr 3, przy uśrednionej sily obciążającej. Finalnie dokonano analizy porównawczej sily niszczącej modele R8 i R9 do uśrednionej wartości sily niszczącej modele R1 do R5. W ten sposób uzyskano procentowy wzrosty nośności pierścieni po zastosowaniu odpowiednich wzmocnień (tabela 2.).

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały znaczny przyrost nośności modeli wzmocnionych w stosunku do modeli niewzmocnionych. W ramach badań rejestrowano również przemieszczenie charakterystycznych punktów modeli oraz odkształcenia materiałów wzmacniających. W chwili zniszczenia wyężenie materiałów wzmacniających wynosiło odpowiednio: 24.48% dla modelu R8 i 26.83 % dla modelu R9.

### Zastosowanie systemów FRCM w obiekcie zabytkowym

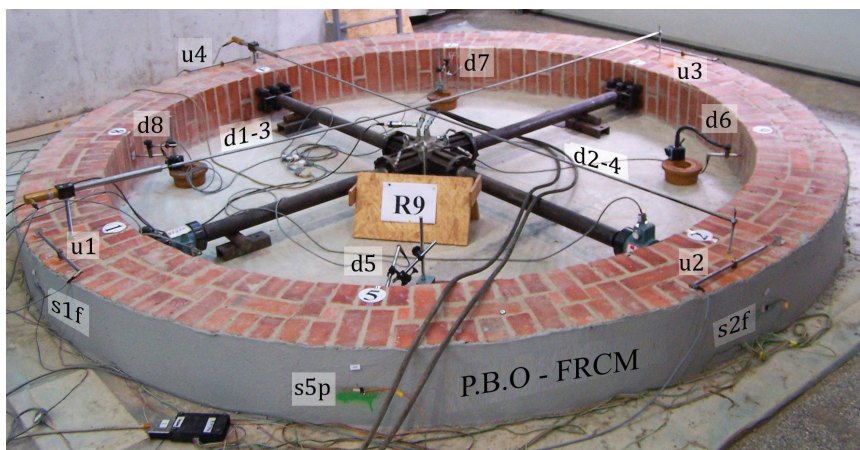
Przykładem zastosowania systemów FRCM w rehabilitacji obiektu zabytkowego jest wzmocnienie pierścienia podporowego górnego kopuły północnej Pawilonu Czterech Kopuły we Wrocławiu. Kopuła o konstrukcji żelbetowej powstała w 1912 r. na podstawie projektu Hansa Poelziga jako część kompleksu wystawowego przy Hali Stulecia. Kopuła żel-

Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne systemów FRCM dla modeli R8 i R9

parametr techniczny	symbol	R8 włókna węglowe	R9 włókna P.B.O.
współczynnik sprężystości niezarysowanej próbki	$E_t^*$	512 GPa	1805 GPa
wytrzymałość na rozciąganie	$f_u$	1031 MPa	1664 MPa
odkształcenie graniczne przy rozciąganiu	$\epsilon_u$	1.000%	1.757%
liczba warstw siatek	e	3	3
całkowite pole przekroju poprzecznego wzmocnienia	$A_{re}$	28,2 mm <sup>2</sup>	27,6 mm <sup>2</sup>
szywność wzmocnienia przy rozciąganiu	$K_{EA}$	2,90 MN	2,62 MN
nośność na rozciąganie materiałów wzmacniających pierścienie	$R_u$	29,1 kN	45,9 kN

Tabela 2. Porównanie sił niszczących modele pierścieni bez wzmocnienia i modeli po wzmocnieniu

model	typ wzmocnienia	sila niszcząca $F_{max}$	iloczynowy przyrost nośności
R1 do R5	brak	2.45 kN	1.0
R8	3 warstwy włókien węglowych	40.56 kN	16.6
R9	3 warstwy włókien P.B.O.	55.25 kN	22.6

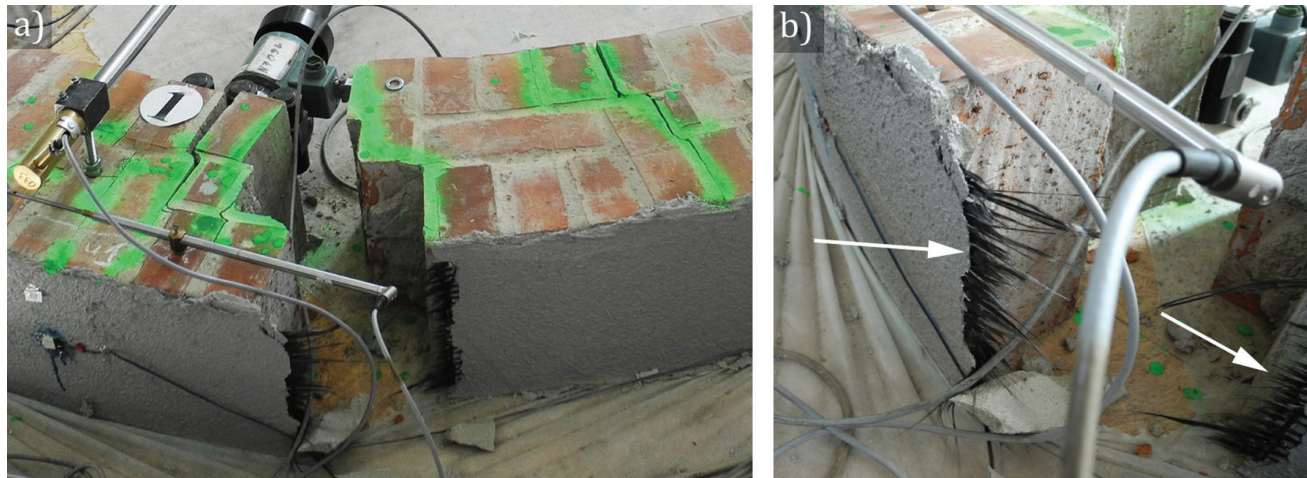


Fot. 1. Model badawczy R9 po wzmocnieniu systemem FRCM na bazie włókien P.B.O.

betowa ma grubość od 120 do 200 mm. Powłoka o podstawie eliptycznej została oparta na pierścieniu żelbetowym, który osadzono na 22 słupach żelbetowych. Całość zrealizowano w technologii monolitycznej.

W trakcie wizyt na obiekcie zidentyfikowano zarysowania występujące na obu podstawowych kierunkach kopuły (równoleżnikowym i południkowym). W przypadku pierścienia górnego wystąpiły pęknięcia pionowe

rozłożone równomiernie, które wskazywały na konieczność wzmocnienia konstrukcyjnego. Na podstawie przeprowadzonej analizy konstrukcyjnej [10] stwierdzono, iż przyczyną pojawienia się zarysowań było niewystarczające zbrojenie. Zaproponowano wzmocnienie powierzchniowe zewnętrzne przy użyciu systemu FRCM w oparciu o siatki z włókien P.B.O. W efekcie uzyskano przyrost nośności całej konstrukcji z jednoczesną kom-



Fot. 2. Mechanizm zniszczenia modelu R8



Fot. 3. Wzmocnienia pierścienia górnego kopuły północnej przy użyciu systemu FRCM: a) siatki z włókien P.B.O. po nałożeniu na matrycę mineralną, b) widok kopuły po renowacji (fot. M. Jackiewicz)

patybilnością zastosowanego wzmocnienia z podłożem historycznym i pozytywnym efektem estetycznym, co jest zgodne z zasadami konserwatorskimi (fot. 3).

Warto nadmienić, że w przypadku wzmocnień wykonywanych przy użyciu systemów FRCM na kierunku obwodowym skuteczność metody jest wysoka zarówno w przypadku konstrukcji żelbetowych, jak i murowanych.

### Wnioski

- 1) Badania laboratoryjne pierścieni ceglanych wykazały znaczny przyrost nośności pierścieni z zastosowanym wzmocnieniem obwodowym w systemie FRCM na bazie włókien węglowych i P.B.O. Przyrost nośności był ponad 16-krotny (dla włókien węglowych) oraz ponad 22-krotny (dla włókien P.B.O).
- 2) Szczególną uwagę należy zwrócić na schemat zniszczenia pierścieni w modelu R9 (system FRCM z włóknami P.B.O), który polegał na zmiążdżeniu cegieł bez naruszenia struktury systemu wzmacniającego. Wskazuje to na osiągnięcie zamierzonego celu wzmocnienia, w którym szybciej niszczy się materiał pierwotny niż zastosowane wzmocnienie współczesne.
- 3) Przyczyną występowania zarysowań kopuły północnej w Pawilonie Czterech Kopuł było niedostateczne zbrojenie, które należało uzupełnić poprzez zastosowanie dodatkowego zbrojenia zewnętrznego.
- 4) Zastosowanie systemu FRCM przy wzmocnieniu kopuły północnej Pawilonu Czterech Kopuł wykazało skuteczność przyjętej metody, łatwość jej aplikacji i możliwość estetycznego ukrycia wzmocnienia, co jest zgodne z zasadami konserwatorskimi.

### Podziękowania

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

Autor składa podziękowania Visbud-Projekt Sp. z o.o. reprezentowanej przez dr. inż. Mariusza Jackiewicza za przekazanie materiałów wzmacniających do badań laboratoryjnych.

### Bibliografia:

- [1] Focacci F., (2008), Rinforzo delle murature con materiali compositi, Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- [2] Grande E., Milani G., (2021), Procedure for the numerical characterization of the local bond behavior of FRCM, *Composite Structures*, Volume 258, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113404>.
- [3] Grande E., Milani G., Imbimbo M., (2020), Theoretical model for the study of the tensile behavior of FRCM reinforcements, *Construction and Building Materials*, Volume 236, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117617>.
- [4] Triantafyllou T.C., Papanicolaou C.G., (2006), Shear Strengthening of Reinforced Concrete Members with Textile Reinforced Mortar (TRM), *Materials and Structures*, V.39, No.1, p. 93–103.
- [5] Yilmaz I.A., Mezrea P.E., Ispir M., Bal I.E., Ilki A., (2014), Confinement of historical brick masonry piers with basalt TRM, *Proceedings of the 2nd International Conference on Protection of Historical Construction*, Bogazici University Publishing, editors: Mazzolani, F.M., Altay G., Istanbul.
- [6] Younis A., Ebead U., (2018), Bond characteristics of different FRCM systems, *Construction and Building Materials*, Volume 175, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.216>.
- [7] Wu H.C., Sun P., (2005), Fiber Reinforced Cement Based Composites Sheets for Structural Retrofit, *Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRCM in Structures*, BBFS, Hong Kong, China.
- [8] Arboleda D., Loreto G., De Luca A., Nanni A., (2010), Material Characterization of Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Laminates, *X International Symposium on Ferro-cement and Thin Reinforced Cement Composites (FERRO 10)*, Havana, Cuba.
- [9] Jasiołko J., Raszczuk K., Frąckiewicz P., Kleszcz K., Bednarski L., (2021), Strengthening of masonry rings with composite materials, *Heritage Science*, nr 9, art. 11, s. 1-9 <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00485-5>.
- [10] Jasiołko J., Raszczuk K., Moczko M., Piechówka-Mielnik M., (2015), Selected aspects of the structural analysis of the north dome in the "Four Domes Pavilion", *Civil and Environmental Engineering Reports.*, vol. 17, nr 2, p. 33–41.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.8384

### PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Raszczuk Krzysztof, 2021, Badania i zastosowanie systemów FRCM na bazie włókien węglowych i P.B.O. przy wzmacnianiu konstrukcji historycznych, „Builder” 5 (286).DOI: 10.5604/01.3001.0014.8384

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono badania własne pierścieni ceglanych wzmocnionych przy użyciu systemów FRCM oraz przykład zastosowania na obiekcie zabytkowym. W ramach badań zostały zrealizowane testy na pierścieniach murowanych z cegły pełnej na zaprawie wapienno-trasowej. Modele były ob-

ciążane od strony wewnętrznej i wzmacniane od strony zewnętrznej. Takie podejście umożliwiało odzwierciedlenie pracy statycznej dolnych pasm kopuł obrotowych oraz ich pierścieni podporowych. Jako przykład aplikacji przedstawiono wzmocnienie górnego pierścienia kopuły północnej Pawilonu Czterech Kopuł we Wrocławiu. Przeprowadzone badania oraz aplikacja na obiekcie rzeczywistym wykazała wysoką skuteczność zastosowania włókien P.B.O. w systemie FRCM we wzmacnianiu konstrukcji historycznych.

**Słowa kluczowe:** wzmacnianie, FRCM, konstrukcje historyczne

**Abstract:** LABORATORY TESTING AND APPLICATION OF FRCM SYSTEMS BASED ON CARBON AND P.B.O. FIBRES IN STRENGTHENING OF HISTORICAL STRUCTURES. The paper presents research work connected with strengthening of masonry rings using FRCM systems and application example on heritage object. During the laboratory investigations different tests on masonry rings, made with clay brick and trass – lime mortar, were carried out. The models were subjected to load from inside and strengthened from outside. That approach allow to reconstruct the real static behavior of lower part of domes or bottom supporting rings. As a case study, the strengthening of top ring in the north dome in Four Domes Pavilion in Wrocław was presented. Both laboratory testing and real application showed the high efficiency of using P.B.O fibres in FRCM systems in strengthening of historical structures.

**Keywords:** strengthening, FRCM, historical structures