



**VISBUD**

Visbud-Projekt Sp. z o.o.  
ul. Swojczycka 82  
51-502 Wrocław  
info@visbud.com  
www.visbud.com  
tel. +48 71 344 04 34

# System FRCM do wzmacniania konstrukcji murowanych

Część I

Historyczne murowane ściany, nadproża, łuki, sklepienia pod wpływem działania różnego rodzaju czynników (zmiana schematów obciążenia, destrukcja materiału, temperatura, wilgotność, osiadanie podłoża etc.) często przestają spełniać przypisane im pierwotnie role konstrukcyjne. Dawne rozwiązania i założenia tracą aktualność, a konstrukcje przyjmują nowe schematy statyczne.

Tradycyjnie stosowane metody naprawy i wzmocnienia historycznych konstrukcji murowych to:

- ściagi,
- powłoki żelbetowe,
- blachy i pręty stalowe doklejane i wklejane,
- konstrukcje drewniane i stalowe umożliwiające podwieszenie żeber i wysklepek,
- inne: m.in. iniekcje, impregnacje, przemurowanie.

Innowacyjne materiały i technologie (szczególnie kompozyty włókniste) są najbardziej efektywnymi spośród nowoczesnych materiałów. Wykazują najlepsze własności wytrzymałościowe przy najmniejszym ciężarze. Są one podstawą wzmacniania konstrukcji w systemach FRP (ang. Fibre Reinforced Polymer) oraz FRCM (ang. Fibre Reinforced Cementitious Matrix). W systemie FRP matrycą łączącą materiał włóknisty ze wzmacnianym elementem jest polimer (żywice), a w systemie FRCM matrycę stanowi zaprawa mineralna. Zbrojenie stanowią głównie włókna węglowe, grafitowe, bazaltowe, PBO, szklane, aramidowe w postaci mat, taśm, siatek, przy czym w systemach FRCM są to, z oczywistych względów, wyłącznie siatki. O ich przydatności decydują bardzo dobre parametry techniczne oraz stosunkowo proste metody wytwarzania.

**Materiały kompozytowe FRCM** są coraz częściej używane do wzmacniania i naprawy zarówno całych konstrukcji murowych, jak i ich poszczególnych elementów (m.in. sklepienia, łuki i kopuły), szczególnie jeśli chodzi o konstrukcje historyczne, których zachowanie w stanie użytkowym jest ważne ze względów kulturowych oraz ze względów bezpieczeństwa.

W systemach FRCM marki RUREGOLD matrycę mineralną stanowi nieorganiczna zaprawa składająca się z hydraulicznego spoiwa na bazie cementów pucolanowych oraz dodatków, które są chemicznie, fizycznie i mechanicznie kompatybilne z podłożem, w szczególności z podłożem ceglany.

Zastosowanie w systemach FRCM zaprawy mineralnej jako matrycy łączącej włókna w różnej postaci z elementem konstrukcyjnym posiada wiele zalet, m.in.:

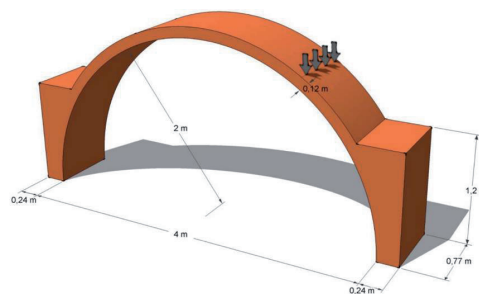
- odporność na działanie wysokiej temperatury jest zbliżona do odporności podłoża ceglano;
- możliwość nakładania na wilgotne podłoża – systemy FRP wymagają zwykle podłoża suchego;

- łatwe nakładanie nawet na nierównych i nieregularnych podłożach – warstwa mineralnej zaprawy wyrównuje podłoże – nie ma więc potrzeby jego wstępnego wygładzenia, tak jak to ma miejsce w przypadku aplikacji systemów FRP;
- łatwe wykonanie – materiał jest mieszany z wodą, a otrzymaną zaprawę nakłada się jak zwykłą zaprawę, po czym osadza się (zatapia) w niej siatkę wzmacniającą;
- urabialność – nie ma większych różnic w stosowaniu systemu w zakresie temperatur od +5°C do +40°C – w systemach FRP, z uwagi na stosowanie żywic syntetycznych, zakres temperatury i wilgotności jest ograniczony;
- wzmocnienie charakteryzuje się wysoką zdolnością rozpraszania energii – konsekwencją tego jest wyższa dopuszczalna odkształcalność elementów konstrukcyjnych (w tym również węzłów);
- jest to system bezpieczniejszy w aplikacji w porównaniu do systemów FRP z zastosowaniem żywic – nakładając zaprawę, wystarczy przestrzegać zwykłych instrukcji dotyczących stosowania zapraw mineralnych;
- narzędzia użyte przy nakładaniu można oczyścić wodą – systemy FRP wymagają użycia specjalnych rozpuszczalników, a w wielu przypadkach narzędzia nie mogą być użyte ponownie.

## Łuki

Wzmocnienie systemami FRCM umożliwia zwiększenie nośności konstrukcji murowej poprzez rozłożenie naprężeń rozciągających na większą powierzchnię. Dodatkowo, część obciążenia jest przejmowana przez wzmocnienie dzięki efektowi skutecznego połączenia wzmocnienia wykonanego z mineralnej zaprawy z wtopioną jedną lub dwiema warstwami siatki, np. z włókna węglowego, z powierzchnią wzmacnianej konstrukcji murowanej. Badania z zastosowaniem tego typu materiałów przeprowadzono między innymi na Politechnice Wrocławskiej (*prof. dr hab. inż. Jerzy Jasieńko, dr inż. Łukasz Bednarz*).

Badania wykonano na szeregu łuków ceglanych o wymiarach – grubość łuku 0,12 m, szerokość 0,77 m, rozpiętość 4 m i o promieniu krzywizny 2 m (rys. 1).



Rys. 1. Model badanego łuku ceglano

Łuki o kształcie odcinka koleby wymurowano z materiałów przypominających swoimi cechami materiały w obiektach zabytkowych (cegły pełnej ceramicznej klasy 100 oraz zaprawy wapiennej). Modele starano się wykonać w tzw. technice „z wolnej ręki”, generując w ten sposób niedoskonałości geometryczne obecne zwykle w sklepieniach historycznych, powstałe już w fazie wykonawstwa. Schemat statyczny podparcia i obciążenia we wszystkich badanych łukach zrealizowano w ten sam sposób, (rys. 2). Wszystkie modele łuków poddano monotonicznie narastającemu obciążeniu, aż do zniszczenia. Obciążenie realizowane było na całej szerokości łuku, przez siłownik umieszczony w 1/3 rozpiętości łuku. Każdy z łuków został wzmocniony w inny sposób. Model A1 – łuk niewzmocniony – świadek. Model A2 – łuk wzmocniony za pomocą systemu FRCM – siatki z włókna węglowego osadzonej w zaprawie mineralnej po stronie grzbietowej. Model A3 – łuk wzmocniony za pomocą 2 taśm węglowych CFRP 150/2000 (o przekroju 100/1.4) doklejenych w rozstawie osiowym 40 cm po stronie grzbietowej oraz systemu FRCM – siatki z włókna węglowego osadzonej w zaprawie mineralnej po stronie grzbietowej. Model A4 – łuk wzmocniony za pomocą materiału FRCM – siatki z włókna węglowego C-Mesh 84/84 osadzonej w zaprawie MX-C 25 Masonry po stronie grzbietowej oraz po stronie podniebienia łuku. Model A5 – łuk wzmocniony za pomocą prętów stalowych Ø8 mm osadzonych w bruzdach wykonanych w powierzchni grzbietowej łuku ceglanego, wklejonych za pomocą kompozycji klejowej na bazie żywicy epoksydowej Epidian 5. Model A6 – łuk wzmocniony 2 taśmami węglowymi CFRP 150/2000 (o przekroju 100/1.4) przyklejonymi w rozstawie osiowym 40 cm po stronie grzbietowej.

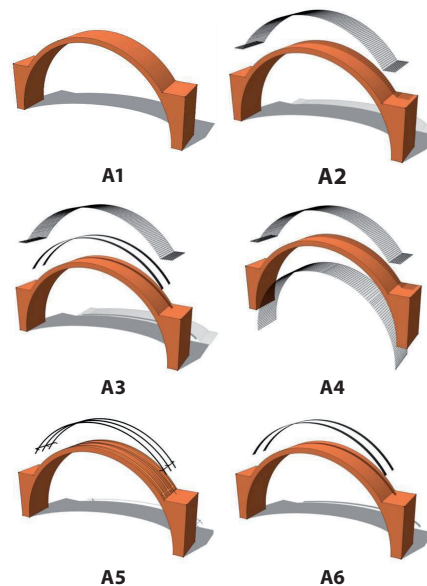
Materiały wzmacniające starano się umieszczać po stronie grzbietowej łuków. Ten sposób wzmacniania jest jedynym możliwym rozwiązaniem w przypadku łuków i sklepień historycznych, bogato dekorowanych po stronie podniebienia.

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wzmacnianie wpływa bardzo korzystnie na nośność i sztywność badanych łuków. Na rys. 5 przedstawiono graniczne wartości siły niszczonej „ $F_{max}$ ” w poszczególnych badanych modelach łuków A2÷A4. Uwidocznił się znaczny wzrost siły niszczonej we wszystkich wzmocnionych łukach w porównaniu z łukiem wzorcowym. Wzmocnione modele osiągnęły również znacznie większe ugięcia niż łuk świadek.

Szczególnie dotyczyło to modeli wzmocnionych w systemie FRCM, w przypadku których odkształcenie i zniszczenie następowało w sposób bardzo płynny i powolny w przeciwieństwie do systemu wzmocnienia C-FRP (model A-6), gdzie zniszczenie nastąpiło gwałtownie.

We wszystkich wzmocnionych modelach łuków zmieniły się schematy zniszczenia w porównaniu z niewzmocnionym łukiem A1. Zmiana schematów zniszczenia i wzrost nośności poszczególnych modeli łuków świadczą o przydatności zastosowanych wzmocnień i poprawności ich wykonania.

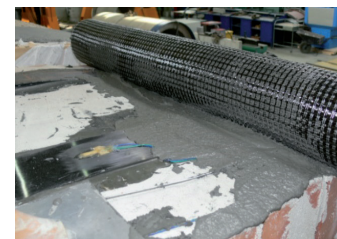
Zaobserwowano również, że zniszczenia połączeń pomiędzy materiałem wzmacniającym a materiałem konstrukcyjnym łuków – w łukach A2, A3, A4 następowały



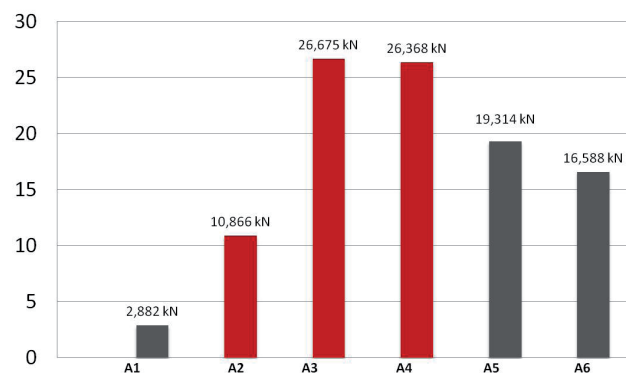
Rys. 2. Modele łuków



Rys. 3. Widok badanego łuku (wraz z czujnikami przemieszczeń) – łuk A2



Rys. 4. Siatka FRCM przyklejana do wzmocnienia z taśm CFRP na grzbiecie łuku A3



Rys. 5. Graniczne wartości siły niszczonej „ $F_{max}$ ” w poszczególnych badanych modelach

w postaci odpajania wzmocnienia FRCM od konstrukcji murowej wraz z fragmentami cegły. Oznacza to, że utrata nośności była dyktowana wytrzymałością podłoża (cegły).

Firma Visbud-Projekt Sp. z o.o., będąca w Polsce wyłącznym przedstawicielem firmy RUREGOLD S.p.a., składa podziękowania: prof. dr. hab. inż. Łukaszowi Drobcowi, prof. dr. hab. inż. Jerzemu Jasieńce, dr. inż. Łukaszowi Bednarzowi, dr. inż. Krzysztofowi Raszczykowskiemu za udostępnienie wybranych fragmentów swoich prac badawczych związanych ze wzmocnieniami konstrukcji systemami FRCM. Prace te są bardzo cenne dla dalszego rozwoju tego kierunku wzmacniania konstrukcji, lepszego ich poznania, a także wprowadzania nowych rozwiązań, które zwiększają efektywność takich wzmocnień.