

mgr inż. Filip Grzymski<sup>1)</sup>  
 dr hab. inż. Tomasz Trapko, prof. PWR<sup>1)\*</sup>  
 dr inż. Michał Musiał<sup>1)</sup>

# Badanie kompozytów PBO-FRCM z wykorzystaniem czujników światłowodowych

## *PBO-FRCM composites testing using fibre optic sensors*

DOI: 10.15199/33.2019.03.07

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono badania kompozytu FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*) z włóknami PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*), w których zastosowano metodę pomiaru odkształceń z wykorzystaniem DFOS (*Distributed Fibre Optic Sensors*). Kompozyty FRCM za pomocą wysokowytrzymałych włókien PBO pozwalają na osiągnięcie dużego przyrostu nośności wzmacnianych konstrukcji żelbetowych bez szybkiej utraty efektywności w sytuacji pożarowej, co jest główną wadą kompozytów FRP (*Fibre Reinforced Polymers*). Zastosowana metoda badawcza, wykorzystująca czujniki światłowodowe, pozwala na geometrycznie ciągły pomiar odkształceń, który jest istotny przy ocenie efektywności pracy kompozytów FRCM. Umożliwia też wyznaczenie miejsca zarysowania elementu żelbetowego. W artykule przeprowadzono analizę przydatności tego typu pomiarów oraz przedstawiono perspektywy rozwoju badań kompozytów PBO-FRCM.

**Słowa kluczowe:** PBO; FRCM; kompozyt; DFOS; żelbet.

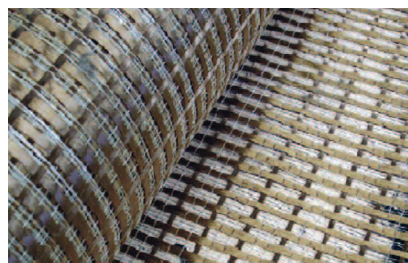
**Abstract.** This paper discusses the research on FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*) composite with PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*) fibres, in which the Distributed Fibre Optic Sensors (DFOS) were used for strain measurements. FRCM composites with high strength PBO fibres allow to gain high load bearing capacity increases of the strengthened RC structure without losing the effect in case of fire situation, as it happens with FRP composites (*Fibre Reinforced Polymers*). The used research method allows to obtain geometrically continuous strain measurement that is important in FRCM composite effectiveness evaluation. Additionally, it allows to find a place of RC element cracking. Suitability analysis of this kind of research method has been carried out and future perspectives on PBO-FRCM composites research are presented.

**Keywords:** PBO; FRCM; composite; DFOS; reinforced concrete.

Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych z wykorzystaniem materiałów kompozytowych jest w ostatnich latach coraz częściej stosowaną alternatywą dla tradycyjnych metod wzmacniania [2]. Najczęściej wybierane są kompozyty FRP (*Fibre Reinforced Polymers*), które składają się z włókien o dużej wytrzymałości (najczęściej węglowych, szklanych lub syntetycznych) zanurzonych w organicznej matrycy polimerowej, zazwyczaj żywicy epoksydowej [1, 2]. W przypadku tego typu kompozytów występują problemy dotyczące niekompatybilności ich matrycy z podłożem betonowym oraz aplikacji na wilgotną powierzchnię [1], ale ich **największą wadą jest mała odporność na podwyższoną temperaturę** [1, 9]. Żywice epoksydowe tracą swoje parametry wytrzymałościowe po przekroczeniu temperatury zeszklenia ( $T_g$ ), która wynosi ok. +50°C [9, 10]. Zwiększe-

nie odporności termicznej materiału może zostać uzyskane dzięki zamianie wrażliwej matrycy organicznej, co było jedną z przyczyn powstania kompozytów FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*). W badaniach udowodniono, że kompozyty FRCM znacznie lepiej zachowują się w warunkach podwyższonej temperatury niż kompozyty FRP [10], a ich matryca mineralna wykazuje lepszą kompatybilność z podłożem i nie jest wrażliwa na wilgoć [1]. W związku z innymi właściwościami fizycznymi matrycy mineralnej konieczne było przearanżowanie włókien kompozytu, które w przypadku kompozytów FRCM nie występują w postaci mat znanych z systemu FRP, tylko w postaci luźno splecionych dwukierunkowych siatek.

Spośród wielu rodzajów włókien wykorzystywanych w kompozytach FRCM szczególnej uwagi warte są włókna PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*), które charakteryzują się bardzo wysokimi parametrami mechanicznymi (fotografia 1). Ich wytrzymałość na rozciąganie wynosi 5800 MPa, a moduł Younga 270 GPa [12]. Tak duże naprężenia



Fot. 1. Siatka z włókien PBO [7]  
 Photo 1. PBO mesh [7]

siatki wymagają odkształceń na poziomie 2,15%, co jest problematyczne ze względu na małą wytrzymałość matrycy mineralnej, która powoduje przedwczesne odspojenie lub poślizg siatki. Zwiększenie wykorzystania materiału jest możliwe przez jego odpowiednie zakotwienie [3, 6, 11].

### Światłowodowe pomiary odkształceń

Kompozyty wzmacniające doznają największych odkształceń w miejscach zarysowania powierzchni elementu, do którego zostały przyklejone. Przewidzenie dokładnego miejsca zarysowania przed obciążeniem elementu, a tym

<sup>1)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji: tomasz.trapko@pwr.edu.pl

samym umieszczenie tam tensometru elektrooporowego, nie jest możliwe. Pomocne w tym przypadku są geometrycznie ciągłe pomiary odkształceń, np. z wykorzystaniem ciągłych czujników światłowodowych DFOS (*Distributed Fibre Optic Sensors*). Do pomiaru wykorzystuje się zaawansowane urządzenia optyczne nazywane reflektometrami, które na podstawie analizy fali świetlnej odbitej od mikrodefektów światłowodu są w stanie określić zmianę jego odkształceń [8]. Jako główne zalety pomiarów światłowodowych wymienia się niewielki rozmiar, masę i koszt czujników oraz geometryczną ciągłość pomiaru. Metoda ta jest szczególnie przydatna do monitorowania stanu konstrukcji istniejących [5]. Światłowody są również z powodzeniem wykorzystywane w badaniach laboratoryjnych [4], dlatego zdecydowaliśmy się sprawdzić ich przydatność przy badaniu kompozytów FRCM.

## Elementy badawcze

W badaniach wykorzystano płyty żelbetowe o rozpiętości 1700 mm, szerokości 1000 mm i grubości 150 mm, wzmocnione kompozytem PBO-FRCM z prętowym zakotwieniem końców siatki. Elementy zniszczono w próbie czteropunktowego zginania, a pomiarów odkształceń powierzchni betonu i kompozytu dokonano z wykorzystaniem czujników światłowodowych oraz tensometrów elektrooporowych (fotografia 2).

Czujniki światłowodowe ułożono na powierzchni betonu oraz kompozytu w sześciu równoległych rzędach w kierunku podłużnym elementu oraz w dwóch rzędach w kierunku poprzecznym. Montaż światłowodów rozpoczęto od dokładnego wyrównania i oczyszczenia powierzchni. Światłowód przyklejono tymczasowo taśmami, aby ustabilizować jego trasę i zapewnić odpowiednie napię-

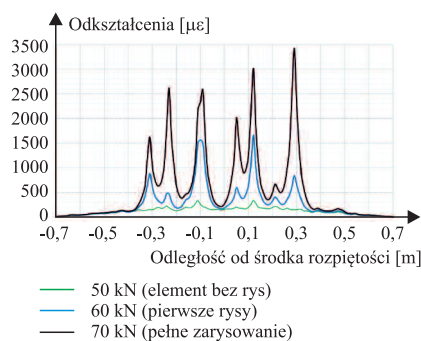


**Fot. 2. Rozeta tensometryczna oraz czujniki światłowodowe przed aplikacją kleju**  
Photo 2. Tensometric rosette and fibre optic sensors before glue application [Fot. F. Grzymalski]

cie włókna. Ostatecznego montażu dokonano z wykorzystaniem kleju epoksydowego, który rozprowadzono równomiernie na całej długości światłowodu, aby zapewnić dobre przenoszenie odkształceń w każdym punkcie pomiarowym.

## Wybrane wyniki pomiarów

Element kontrolny bez wzmocnienia kompozytowego uległ zniszczeniu przy sile ok. 171 kN, natomiast element wzmocniony kompozytem PBO-FRCM z zakotwieniem prętowym końców siatki pozwolił na przeniesienie siły 222 kN, co przekłada się na ok. 30% przyrost nośności. Zmierzono również charakterystyczne wartości odkształceń wzmacnianego elementu i kompozytu. Zastosowanie rozłożonych czujników światłowodowych pozwoliło na uzyskanie wyników, które wykraczają poza możliwości tensometrów elektrooporowych. Szczególnie użyteczne do analizy pracy elementu okazały się wskazania miejsca zarysowania, które na wykresach objawiają się w formie pików odkształceń. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowo



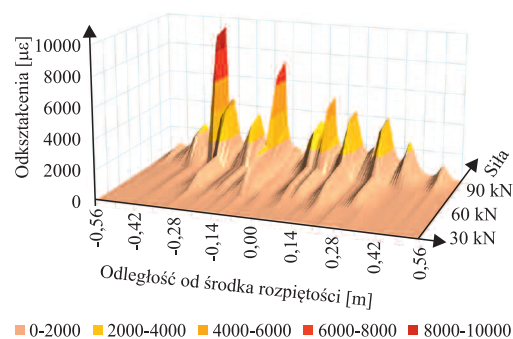
**Rys. 1. Rozkład odkształceń podłużnych betonu pod kompozytem PBO-FRCM – widoczne zarysowanie**

Fig. 1. Longitudinal strains of concrete under PBO-FRCM composite – visible cracking

wy rozwój zarysowania płyty przy jej krawędzi. Stwierdzono 7 głównych zarysowań elementu, co pokrywa się z oceną wizualną zarysowania przeprowadzoną na bocznej krawędzi elementu. W przypadku elementu niewzmocnionego rysy pojawiały się w większych odstępach, co nie jest korzystne z punktu widzenia ich rozwartości. Analiza rozkładu odkształceń uzyskane bezpośrednio przed momentem zarysowania pokazała, że miejsce wystąpienia rysy ujawnia się, za-

nim znacznie ona być widoczna, co można wykorzystać przy analizie stanu istniejącej konstrukcji. Dodatkowo, przy odpowiednio gęstym ułożeniu światłowodów na powierzchni elementu płytowego, możliwe jest wyznaczenie morfologii powstających w nim zarysowań. Taką analizę, podobnie jak w zaprezentowanym przypadku, można wykonać pod warstwą kompozytu, bez jego usuwania, co nie jest możliwe w przypadku innych metod pomiarowych. Wadą pomiarów światłowodowych jest ich nieciągłość w czasie i potrzeba zatrzymania procesu obciążania w celu akwizycji danych. W przypadku małych kroków obciążenia znacznie wydłuża to czas pomiaru.

Geometryczna ciągłość pomiaru pozwala na osiągnięcie dużej rozdzielczości pomiaru odkształceń, przez co są one bardziej miarodajne. Unika się możliwości pomiaru w punkcie, w którym wartość odkształceń jest niereprezentatywna. Dzięki temu możliwe jest opracowanie dokładnych wykresów przedstawiających rozwój odkształceń elementu w czasie badania. Na rysunku 2 przedstawiono odkształcenia kompozytu w początkowej fazie obciążenia. Kompozyt PBO-FRCM zaczyna się zauważalnie odkształcać dopiero po zarysowaniu powierzchni betonu, do której przymocowano wzmocnienie. Kolejny skokowy przyrost odkształceń widoczny jest po przekroczeniu obciążenia 80 kN, kiedy powstają duże zarysowania matrycy kompozytu PBO-FRCM. W przypadku wyższych wartości obciążeń uwiadczenia się znaczny wpływ wyciągania włókna światłowodowego z kleju w obrębie zarysowania, co powoduje, że wyniki są nieczytelne.



**Rys. 2. Przyrost odkształceń podłużnych kompozytu PBO-FRCM w czasie badania**

Fig. 2. Increase of longitudinal strains of PBO-FRCM composite during testing

