

dr inż. Tomasz Trapko^{1*)}
mgr inż. Dorota Urbańska¹⁾
mgr inż. Tomasz Kowalik¹⁾

Wyzwania we wzmacnianiu elementów betonowych

Challenges in strengthening of concrete elements

DOI: 10.15199/33.2015.10.28

(Artykuł przeglądowy)

Streszczenie. W artykule przedstawiono technologię wzmacniania elementów betonowych za pomocą siatki PBO łączonej z betonem za pomocą zaprawy mineralnej. Przedmiotem zainteresowania autorów jest możliwość wykorzystania tego typu systemu do wzmacniania na ścinanie belek żelbetowych, tarcz żelbetowych oraz elementów ściskanych. W artykule przedstawiono doświadczenia autorów we wzmacnianiu tego typu elementów za pomocą siatki PBO na zaprawie mineralnej.

Słowa kluczowe: wzmacnianie, siatka PBO, belka, tarcza, słup, FRCM.

Abstract. In the paper a technology of reinforced concrete elements strengthening with PBO mesh bonded with a mineral mortar was presented. The possibilities of application of this system in shear strengthening of reinforced concrete beams, plane-loaded plates and compressed elements are in the range of interests of the authors. In the paper authors experiences in strengthening of such type elements with PBO mesh bonded with mineral mortar were described.

Keywords: strengthening, PBO mesh, beam, RC wall, column, FRCM.

Tematyka wzmacniania konstrukcji betonowych za pomocą materiałów kompozytowych FRP (*Fibre Reinforced Polymers*) od ponad dwóch dekad jest obecna w inżynierii budowlanej. W systemach FRP żywica epoksydowa decyduje o trwałości i skuteczności wzmocnienia. Łączy ona kompozyt z betonem. Natomiast, jak wykazano w wielu badaniach, parametrem decydującym o efektywności wzmocnienia jest temperatura, w jakiej użytkuje się wzmocniony element. Graniczną temperaturą w przypadku systemów FRP jest temperatura zeszklenia żywicy epoksydowej, po przekroczeniu której spoiwo traci swoje właściwości. Problem ten można wyeliminować przez stosowanie zabezpieczeń termicznych na wzmocnionych elementach lub zrezygnowanie z żywicy jako spoiwa łączącego kompozyt z betonem.

W systemie FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*) żywicę zastąpiono zaprawą mineralną, która pokrywa wzmacniany element i łączy się z włóknami siatki kompozytowej, zapewniając jej przyczepność do betonu. Jednym z materiałów wzmacniających stosowanych w tym systemie jest siatka z włókien PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*), potocznie nazywana siatką PBO. System ten oznacza się w literaturze jako PBO-FRCM. W tabeli porównano parametry techniczne siatki PBO i najpopularniejszej maty kompozytowej z włókien węglowych CFRP.

Parametry techniczne siatki PBO i maty CFRP [1]

Technical parameters of PBO mesh and CFRP sheet [1]

Typ włókien	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Odkształcenia przy zerwaniu [%]	Gęstość [g/cm ³]	Grubość włókien [mm]
PBO	5270 ^(a,b) 5800 ^(b)	270	2,15	1,56	0,0455
CFRP	2670 ^(a,c) 4300 ^(b,d)	238	1,80	1,76	0,1310

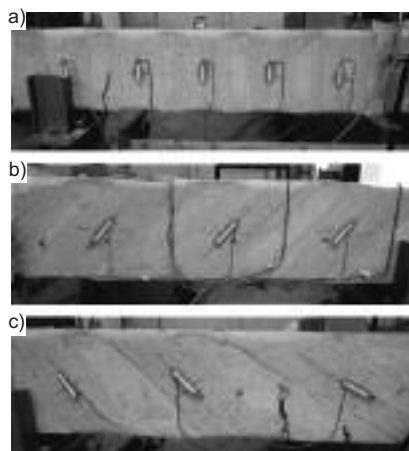
(a) wg badań własnych; (b) wg danych producenta; (c) dane laminatu; (d) dane włókien; (a) according to own tests; (b) according to the producers; (c) data for the laminate; (d) data for the fibers

Wzmacnianie na ścinanie belek żelbetowych

System PBO-FRCM może być skutecznie stosowany do wzmacniania stref podporowych belek żelbetowych, co wykazano m.in. w badaniach własnych wykonanych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej [2, 3]. Belki wzmocnione w systemie PBO-FRCM wykazują bardziej plastyczny charakter pracy niż elementy wzmocnione w systemie FRP. Ma to związek z poślizgiem, jaki występuje w warstwie kontaktowej zaprawa-włókna, a którego nie ma w systemach FRP. W większości badań belek wzmocnionych na ścinanie za pomocą siatki PBO stosowany był system wzmocnienia otwartego typu U [4-6], bez dodatkowego zakotwienia końcówek kompozytu. Mechanizm zniszczenia polegał na odspojeniu się końców wzmocnienia od powierzchni betonu, co doprowadziło do niepełnego i mało efektywnego wykorzystania siatki PBO, np. w badaniach [5, 6] odkształcenia w kompozycie wynosiły zaledwie 2,5–3,5%. Lepsze wykorzystanie siatki PBO możliwe jest

przy odpowiednim zakotwieniu strzemion kompozytowych, co było przedmiotem wykonanych przez nas badań [2, 3].

Wykonano i przebadano belki żelbetowe wzmocnione na ścinanie za pomocą zewnętrznych strzemion z siatki PBO na zaprawie mineralnej. Belkę B1 (fotografia 1a) wzmocniono przez owinięcie przekroju strzemionami PBO, pod kątem 90° do osi podłużnej, z połączeniem ich na zakład na górnej powierzchni belki. W belce B2 strzemiona PBO pochyłono pod kątem 45° (fotografia 1b), a w belce B3 pod trzema kątami – 30°, 45° i 60° do osi podłużnej (fotografia 1c). W belkach B2 i B3 wykonano nacięcia na dolnej i górnej powierzchni belki, w które wklejono końce strzemion PBO za pomocą żywicy epoksydowej (w belce B2 i na spodzie belki B3)



Fot. 1. Schemat wzmocnienia belek na ścinanie: a – belka B1; b – belka B2; c – belka B3
Photo. 1. The scheme of the beams strengthening for shearing: a – beam B1; b – beam B2; c – beam B3

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Autor do korespondencji:
e-mail: tomasz.trapko@pwr.edu.pl

70 lat Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego

lub zaprawy mineralnej (w górnej powierzchni belki B3). We wszystkich belkach szerokość strzemion PBO wynosiła 100 mm.

Mechanizm zniszczenia belki B1 polegał na rozwarstwieniu zakładu na górnej powierzchni elementu (fotografia 2). W belkach B2 i B3 nastąpiło wyrwanie kompozytu z zakotwienia (fotografia 3). Odształcenia zakotwionych strzemion PBO wyniosły 3,7 – 5,0%. Oznacza to znacząco poprawę stopnia wykorzystania kompozytu w porównaniu z badaniami wzmocnień otwartych typu U. Należy dodać, że we wszystkich badanych belkach nie doszło do rozerwania włókien PBO. Badania te są przyczynkiem do prac mających na celu opracowanie skutecznego sposobu zakotwienia strzemion PBO, który pozwoliłby zwiększyć udział kompozytu w nośności belki na ścinanie.



Fot. 2. Zniszczenie belki B1 – rozwarstwienie zakładu na górnej powierzchni
Photo. 2. Failure of beam B1 – delamination of the lap on the top surface



Fot. 3. Zniszczenie belki B3 – wyrwanie końcówek strzemion PBO z zakotwienia
Photo 3. Failure of beam B3 – pulling the endings of PBO stirrups out of the lap

Wzmocnianie tarcz żelbetowych

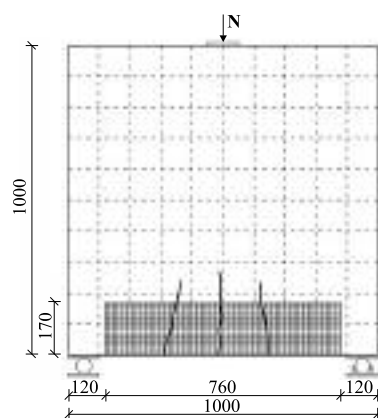
Żelbetowe tarcze są integralną częścią wielu konstrukcji, m.in. zbiorników, silosów, hal przemysłowych oraz budynków szkieletowych. W zależności od zmieniającego się przeznaczenia obiektu, niejednokrotnie zmienia się ich schemat statyczny lub charakter obciążenia, co zasadniczo wpływa na ich pracę. W związku ze zmianą przeznaczenia obiektu konieczne może być powiększenie istniejących lub wykonanie nowych otworów, co czasami wy-

maga wycięcia (przecięcia) istniejącego głównego zbrojenia rozciągającego. Zazwyczaj małe otwory pomija się w analizie. W przypadku dużych otworów, a co za tym idzie usunięcia części betonu i zbrojenia, może dojść do nadwyrężenia elementu, w konsekwencji do zarysowania, a w ostateczności do jego zniszczenia. Aby temu zapobiec, obszary wokół powiększanych lub wycinanych otworów powinny być odpowiednio wzmocnione. Jednym ze sposobów jest stosowanie dodatkowego, zewnętrznego wzmocnienia kompozytowego [7, 8].

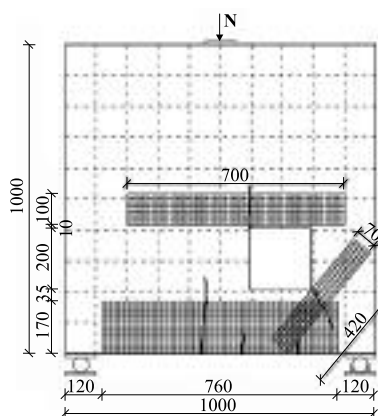
Na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej prowadzone są badania mające na celu ocenę efektywności wzmocniania tarcz żelbetowych za pomocą siatki z włókien PBO na zaprawie mineralnej. Wykonaliśmy dwa typy tarcz żelbetowych – pełnościenne (rysunek 1) i z otworem (rysunek 2). Cechą charakterystyczną wykonanych tarcz z otworem był brak odpowiedniego zbrojenia

w obrębie otworu [9]. Obciążenie przekazywane było na tarczę przez jedną siłę skupioną w środku rozpiętości i miało charakter obciążenia wielokrotnie zmiennego. Taka natura obciążania odzwierciedla charakter pracy elementów tarczowych, m.in. w zbiornikach, zasobnikach czy silosach. W pierwszym etapie badań każdy element obciążono do osiągnięcia granicznej rozwarstości rysy prostopadłej wynoszącej 0,3 mm [10]. W tarczy pełnościennej przecięto główne pręty zbrojeniowe (w dolnej części), co miało zasymulować powiększanie istniejącego otworu. Tarcze wzmocniono w miejscach, w których powstały największe zarysowania podczas pierwszego obciążania (fotografie 4 i 5). Po wzmocnieniu elementy zostały poddane próbie zniszczenia pod obciążeniem wielokrotnie zmiennym.

Zastosowanie siatki PBO okazało się skutecznym sposobem wzmocnienia obydwu tarcz. Jednak ze względu na zaobserwowany mechanizm zniszczenia należy



Rys. 1. Schemat wzmocnienia tarczy pełnościennej wraz z rozmieszczeniem pierwszych rys
Fig. 1. The scheme of the solid deep beam strengthening with the view of the first cracks



Rys. 2. Schemat wzmocnienia tarczy z otworem wraz z rozmieszczeniem pierwszych rys
Fig. 2. The scheme of the deep beam with the opening strengthening with the view of the first cracks



Fot. 4. Obraz zniszczenia tarczy pełnościennej
Photo 4. The view of the solid deep beam failure



Fot. 5. Obraz zniszczenia tarczy z otworem
Photo 5. The view of the deep beam with the opening failure

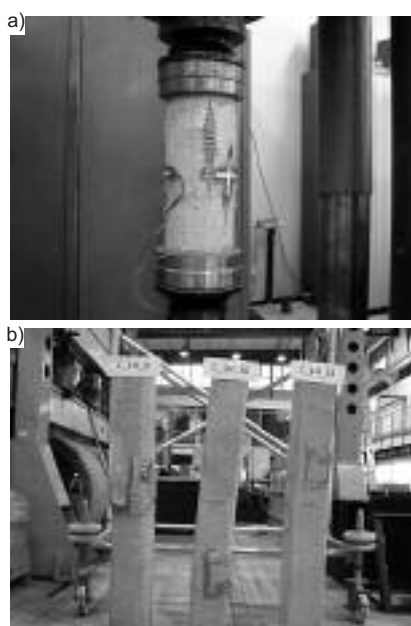
uznać je za mało efektywne. Zniszczenie następowało na skutek poślizgu siatki PBO w strefie zaprawy mineralnej na połączeniu z betonem. Poślizg wzmocnienia rozpoczął się przy obciążeniu ok. 74% maksymalnej siły niszczącej w przypadku tarczy pełnościennej i 67% maksymalnej siły niszczącej – tarczy z otworem. Maksymalne odkształcenia, jakie zanotowano w kompozycie na początku delaminacji, to 1,68‰ w tarczy pełnościennej na dole i 2,68‰ w tarczy z otworem, w siatce pod kątem. Nie stwierdzono rozerwania włókien siatki PBO, a co za tym idzie nie wykorzystano w pełni jej wytrzymałości na rozciąganie.

Wzmocnienie nie zostało w pełni wykorzystane, a obserwowany poślizg siatki PBO w warstwie zaprawy mineralnej spowodowany był brakiem odpowiedniego zakotwienia materiału kompozytowego. Wprawdzie w dolnej części tarczy za częściowe zakotwienie można uznać przyklejenie dodatkowej warstwy siatki PBO w kształcie litery U, jednak okazało się ono niewystarczające. Skuteczne zakotwienie siatki PBO w pełni pozwoliłoby wykorzystać jej właściwości wytrzymałościowe.

Wzmocnianie elementów ściskanych

Badania betonowych elementów ściskanych wzmocnionych siatką PBO na zaprawie mineralnej, wykonane na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, były jednymi z pierwszych na świecie i pierwszymi w Polsce. Celem tych badań była ocena możliwości wykorzystania siatki PBO do wzmocniania ściskanych elementów betonowych, zarówno w +20 °C, jak i warunkach wysokiej temperatury [1, 11]. Odbakowany materiał źródłowy pokazuje wpływ liczby warstw wzmocnienia poprzecznego, sposobu ukształtowania wzmocnienia poprzecznego oraz jednoczesnego wzmocnienia podłużnego i poprzecznego na nośność i odkształcalność ściskanych osiowo oraz mimośrodowo elementów betonowych i żelbetowych. Badaniom poddano modele betonowe i słupy żelbetowe w skali naturalnej. Wyczerpanie nośności elementów ściskanych uzwojonych matami kompozytowymi następuje na skutek zerwania ciągłości wzmocnienia w kierunku owinięcia. W elementach owiniętych siatką PBO zniszczenie inicjowane jest rozwarstwieniem połączenia siatki na zewnętrznym zakładzie. Taki mechanizm zniszczenia,

klasyfikowany do grupy, za które odpowiedzialna jest matryca, polegający na rozerwaniu szwu (seam debond), zaobserwowano zarówno w próbkach betonowych (fotografia 6a), jak i w słupach żelbetowych (fotografia 6b). Podobnie, jak w przypadku belek wzmocnionych na ścinanie i tarcz, nie zaobserwowano rozerwania włókien PBO, co świadczy o niewykorzystaniu wytrzymałości siatki PBO na rozciąganie. Współczynnik wykorzystania kompozytu PBO, w strefie końca zakładu, w zależności od jego długości wyniósł 0,28 – 0,44 [12]. Jednocześnie analizując wartości odkształceń poprzecznych, poza strefą zakładu widać, że współczynnik wykorzystania siatki PBO to 0,55 – 0,80.



Fot. 6. Elementy ściskane wzmocnione siatką PBO: a) ściskana osiowo próbka betonowa $\phi 113/300$ mm wzmocniona dwiema warstwami siatki PBO; b) ściskane mimośrodowo słupy żelbetowe $200 \times 200 \times 1500$ mm wzmocnione jedną warstwą siatki PBO (od lewej: 0, 16 mm i 32 mm)

Photo 6. Compressed elements strengthened with the PBO mesh: a) concrete specimen $\phi 113/300$ mm strengthened with two layers of the PBO mesh subjected to axial compression; b) reinforced concrete columns $200 \times 200 \times 1500$ mm strengthened with one layer of the PBO mesh subjected to eccentric compression (from the left side: 0, 16 mm and 32 mm)

Podsumowanie

Wykonane przez nas badania pokazują duży potencjał systemu PBO-FRCM jako skutecznego wzmocnienia konstrukcji z betonu. Nie zastąpi on jednak i nie eliminuje kompozytów żywicznych FRP.

System wzmocniania należy tak dobrać, aby gwarantował osiągnięcie zamierzonych celów doraźnie i w dłuższym czasie. Wyborowi temu powinna towarzyszyć pełna wiedza na temat wzmocnianego elementu, w tym taka, która pozwoli przewidzieć ewentualne zagrożenia wzmocnionej konstrukcji. Należy uwzględnić korzyści i zagrożenia, jakie niosą ze sobą obydwa systemy – FRP i PBO-FRCM.

Najważniejszym zadaniem na przyszłość jest opracowanie efektywnej metody kotwienia siatki PBO na zewnętrznym zakładzie, tak aby w pełni można było wykorzystać jej właściwości wytrzymałościowe.

Literatura

- [1] Trapko T.: Fibre Reinforced Cementitious Matrix confined concrete elements. *Mater Design*. 2013, vol. 44, s. 382 – 391.
- [2] Trapko T., Urbańska D., Kamiński M.: Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites. *Compos Part B-Eng*. 2015, vol. 80, s. 63 – 72.
- [3] Urbańska D., Trapko T., Kowalik T.: Nośność na ścinanie belek żelbetowych wzmocnionych materiałami PBO-FRCM. *Materiały Budowlane*. 2015, nr 6, s. 66 – 67. DOI:10.15199/33.2015.06.24.
- [4] Ombres L.: Shear capacity of concrete beams strengthened with cement based composite materials. In: *Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. (CICE 2012). Roma, Italy; 2012, Paper No. 01-281.
- [5] Ombres L.: Structural performances of reinforced concrete beams strengthened in shear with a cement based fiber composite material. *Compos Struct*. 2015, 122, s. 316 – 329.
- [6] Ambrisi A. D., Focacci F.: Flexural strengthening of RC beams with cement based composites, *J Compos Constr ASCE*. 2012, 15 (5), s. 707–720.
- [7] Mohammed B. S., Ean L. W., Hossain K. M. A.: CFRP composites for strengthening of reinforced concrete walls with openings. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 1 (4), s. 1841 – 1852.
- [8] Quazi S., Michel L., Ferrier E., Ali L.: Strut-and-tie model for a reinforced concrete wall strengthened with carbon fibre-reinforced polymers. *Compos Struct*. 2015, 128, s. 87 – 99.
- [9] Starosolski W.: Konstrukcje żelbetowe wg PN-B-03264: 2002 and Eurokodu 2. 2009, PWN, Warszawa.
- [10] PN-EN 1992-1-1:2008, Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [11] Trapko T.: The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements. *Compos Part B-Eng*. 2013, 54, s. 138 – 145.
- [12] Trapko T.: Odkształcalność ściskanych elementów betonowych wzmocnionych materiałami kompozytowymi FRCM. *Budownictwo i Architektura*. 2013, 12 (1), s. 163 – 170.

Przyjęto do druku: 21.08.2015 r.