

mgr inż. Dorota Urbańska<sup>1)</sup>  
dr inż. Tomasz Trapko<sup>1\*)</sup>  
inż. Tomasz Kowalik<sup>1)</sup>

# Nośność na ścinanie belek żelbetowych wzmocnionych materiałami PBO-FRCM

## Shear capacity of RC beams strengthened with PBO-FRCM

DOI: 10.15199/33.2015.06.24

(Studium przypadku)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań nośności belek żelbetowych wzmocnionych na ścinanie materiałami kompozytowymi PBO-FRCM. Wyniki badań eksperymentalnych porównano z wartościami teoretycznymi uzyskanymi z metody bazującej na analogii kratownicowej Rittera-Mörscha.

**Słowa kluczowe:** belki żelbetowe, wzmocnienie, ścinanie, PBO-FRCM.

**Abstract.** This paper describes research of reinforced concrete beams strengthened in shear with PBO-FRCM composites. The experimental results are compared with the theoretical model based on the Ritter-Mörsch criteria failure.

**Keywords:** reinforced concrete beams, strengthening, shear, PBO-FRCM.

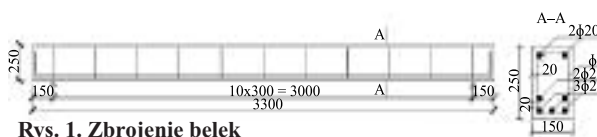
**W**zmocnianie belek żelbetowych za pomocą materiałów kompozytowych jest powszechnie znanym sposobem zwiększania ich nośności. Największą popularnością cieszą się wzmocnienia FRP (*Fibre Reinforced Polymers*) aplikowane do powierzchni elementu za pomocą żywicy epoksydowej. Nowym systemem wzmocnienia jest FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*), w którym żywicę epoksydową zastąpiono zaprawą mineralną. Pełni ona taką samą rolę jak żywica, ale jest bardziej odporna na temperaturę. W systemie FRCM używa się takich samych włókien kompozytowych jak w systemach FRP, a także włókien z grupy poliamidów PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*).

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych trzech belek żelbetowych wzmocnionych na ścinanie w systemie PBO-FRCM i porównano uzyskane wyniki z nośnością teoretyczną. W związku z tym, że dla wzmocnień PBO-FRCM nie ustanowiono normy projektowej, obliczenia nośności na ścinanie przeprowadzono, korzystając z analogii kratownicowej Rittera-Mörscha, stosując wytyczne dotyczące materiałów FRP.

### Przygotowanie belek do badań

Przedmiotem badań były 3 belki żelbetowe o przekroju 150 x 250 mm i długości 3300 mm, zbrojone, jak na rysunku 1, prętami wykonanymi ze stali B500SP ( $f_{ym} = 526,2$  MPa,  $E_s = 187$  GPa). Belki

<sup>1)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:  
e-mail: tomasz.trapko@pwr.edu.pl



Rys. 1. Zbrojenie belek  
Fig. 1. Steel reinforcement of beams

wykonano z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie  $f_{cm,cyl} = 42,9$  MPa i module sprężystości  $E_{cm} = 29,8$  GPa. Przed wzmocnieniem belek na ścinanie obciążono je wstępnie do zarysowania ukośnego i prostopadłego o rozwarości rys 0,1 mm.

Do wzmocnienia belek na ścinanie użyto siatek PBO [1] o właściwościach przedstawionych w tabeli 1, z których wykonano strzemiona szerokości 100 mm, o róż-

Tabela 1. Właściwości włókien PBO i systemu PBO-FRCM [1, 2]

Table 1. Mechanical parameters of the PBO and PBO-FRCM strengthening materials

	$f_{tu}$ [MPa]	$E_t$ [GPa]	$\epsilon$ [%]
Włókna PBO	5800	270	2,15
System PBO-FRCM	1664	137	1,76

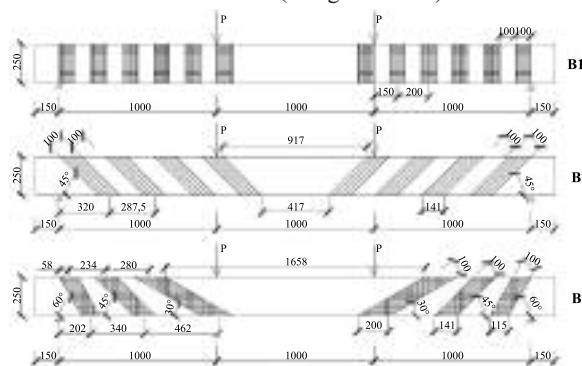
nym rozstawie i kącie nachylenia włókien do osi podłużnej belek (rysunek 2). Belkę B1 wzmocniono przez owinięcie przekroju strzemionami PBO z połączeniem ich na zakład na górnej powierzchni belki. W belkach B2 i B3 wykonano nacięcia na dolnej i górnej powierzchni, w które wklejono końce siatek PBO za pomocą żywicy epoksydo-

wej (belka B2 i spód belki B3) lub zaprawy mineralnej (w nacięciach na górnej powierzchni belki B3).

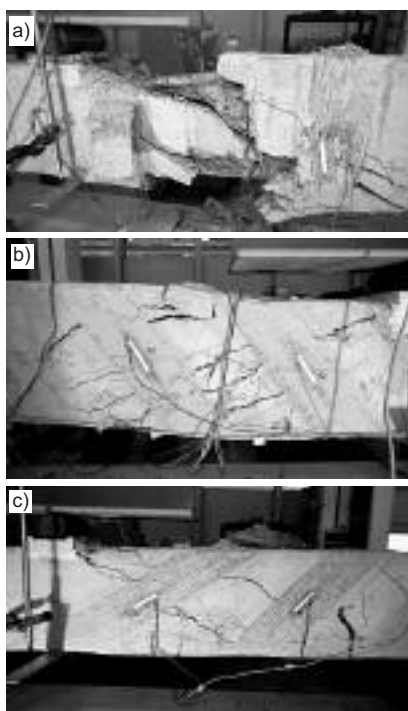
### Wyniki badań

Wszystkie belki wykazywały podobny mechanizm zniszczenia poprzez oderwanie się siatki z zakładu lub wyrwanie z zakotwienia. Zniszczenie belek na ścinanie poprzedzone zostało powstaniem wielu rys ukośnych przed oderwaniem się siatki PBO o rozwarości 1 ÷ 2 mm. W żadnej belce nie nastąpiło zerwanie włókien siatki PBO.

Belka B1 zniszczyła się na skutek odspojenia się włókien siatki PBO na zakładzie, aż do oderwania się siatki PBO z górnej i bocznych powierzchni betonu, a następnie zerwania strzemion stalowych (fotografia a), natomiast belki B2 i B3 na skutek wyrwania siatek PBO z zakotwienia i zmiażdżenia betonu na górnej powierzchni (fotografie b i c).



Rys. 2. Schemat wzmocnienia belek na ścinanie  
Fig. 2. Schemes of strengthening of the beams



**Zniszczenie belki: a) B1; b) B2; c) B3**  
*Beam failure: a) B1; b) B2; c) B3*

## Model obliczeniowy

Model obliczeniowy belek żelbetonowych wzmocnionych na ścinanie za pomocą materiałów kompozytowych [3] bazuje na założeniu wspólnego udziału betonu, stali i materiału kompozytowego w nośności elementu na ścinanie:

$$V_n = V_c + V_s + V_f \quad (1)$$

gdzie:

$V_c$ ,  $V_s$  i  $V_f$  – nośność na ścinanie odpowiednio betonu, strzemion stalowych i zewnętrznego zbrojenia kompozytowego.

Wartości  $V_c$  i  $V_s$  mogą być obliczane na podstawie wzorów z norm do projektowania konstrukcji żelbetonowych [6].

Udział wzmocnienia kompozytowego w nośności na ścinanie można obliczyć na podstawie naprężeń rozciągających w miejscu rysy ukośnej w materiale kompozytowym, korzystając z analogii kratownicowej Rittera-Mörscha. Zakłada się, że wszystkie paski materiału kompozytowego przecięte rysą ukośną przenoszą te same efektywne naprężenia, a modele obliczeniowe różnią się między sobą wartością naprężeń. Udział zbrojenia kompozytowego w nośności na ścinanie można wyrazić wzorem (2):

$$V_f = \varepsilon_{fu} E_f \rho_f b d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha = \\ = [(A_f \sigma_{fu} d) / s] (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (2)$$

gdzie:

$\varepsilon_{fu}$  – odkształcenia efektywne kompozytu;  
 $E_f$  – moduł sprężystości kompozytu;

$\rho_f = 2n_f t_f w_f / (b s_f)$  – stopień zbrojenia kompozytowego;  
 $n_f$  – liczba warstw zbrojenia kompozytowego;  
 $t_f$  – grubość jednej warstwy;  
 $w_f$  – szerokość paska siatki kompozytowej;  
 $s_f = s \sin \alpha$  – osiowy rozstaw pasków;  
 $s$  – rozstaw pasków wzdłuż belki;  
 $b$  i  $d$  – szerokość i wysokość użyteczna przekroju belki;  
 $\theta$  – kąt nachylenia krzyżulca betonowego;  
 $\alpha$  – kąt nachylenia włókien kompozytowych do osi podłużnej belki.

Zgodnie z zaleceniem [4] należy przyjmować kąt  $\theta$  równy  $45^\circ$ . Na podstawie badań stwierdzono, że kąt nachylenia krzyżulców betonowych wynosi do  $30^\circ$ . Najważniejszym elementem wzoru (2) jest poprawne przyjęcie efektywnych odkształceń  $\varepsilon_{fu}$ , które można rozumieć jako średnie odkształcenia we włóknach przeciętych rysą ukośną w momencie zniszczenia. Jest to podstawowy czynnik różniący systemy FRP i FRCM. Połączenie betonu i materiału kompozytowego w systemie FRCM jest determinowane przez zjawisko poślizgu, spowodowane stopniowym odrywaniem włókien od betonu lub brakiem przyczepności między zaprawą a siatką kompozytową. W związku z tym, że przeprowadzono niewiele badań dotyczących połączeń siatki z betonem wg systemu FRCM, zdecydowano, że materiały FRCM mogą być traktowane jak ich odpowiedniki FRP. Przemnożono więc efektywne odkształcenia przez odpowiedni współczynnik efektywności wzmocnienia  $k_e$ , który wg [5] można przyjmować równy 0,5.

W celu porównania wyników badań doświadczalnych z wynikami modelu obliczeniowego, wyznaczono teoretyczną nośność elementu wzmocnionego na ścinanie wg zależności (2).  $V_c$  i  $V_s$  wyznaczono ze wzorów wg [6]. Przyjęto kąt  $\theta = 45^\circ$ , co wynika z zaleceń [4] oraz kąt  $\theta = 30^\circ$ , co wynika z badań własnych, natomiast w przypadku belki B3 kąt nachylenia strzemion z siatki PBO  $\alpha = 30^\circ$ . W obliczeniach udziału zbrojenia kompozytowego  $V_f$

uwzględniono współczynnik  $k_e = 0,5$ . Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Porównując wyniki obliczeń z badaniami, widać, że zgodnie z podejściem normy [4], nośność teoretyczna jest ok. 40% mniejsza od nośności doświadczalnej. Założenie, że kąt  $\theta = 30^\circ$  doprowadziło do większej zgodności obliczonej nośności na ścinanie z nośnością z badań.

## Podsumowanie

Wzmocnienia belek żelbetonowych na ścinanie za pomocą zewnętrznych strzemion z siatki PBO skutecznie poprawiają ich nośność. Na podstawie badań wykazano, że ważnym elementem efektywnego wzmocnienia na ścinanie siatką PBO jest odpowiednie zakotwienie kompozytu. Autorzy uważają, że założenie normy [4] dotyczące przyjmowania wartości kąta nachylenia krzyżulców betonowych  $\theta = 45^\circ$  jest bezpieczne. Ewentualne obniżenie wartości kąta  $\theta < 45^\circ$  wymaga weryfikacji doświadczalnej na większej liczbie zróżnicowanych elementów.

Fotografie i rysunki – Autorzy

## Literatura

- [1] Ruredil X Mesh Gold Data Sheet, Ruredil SPA, Milan, Italy, 2009.
- [2] AC 434 Design Criteria Report For Ruredil FRCM Composite Systems, University of Miami, 2013.
- [3] Ombers L. Structural performances of reinforced concrete beams strengthened in shear with a cement based fiber composite material. Compos Struct, 2015; 12, s: 2316 – 329.
- [4] CNR DT 200: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2004.
- [5] Si Larbi A., Contamine R., Ferrier E., Hamelin, P.: Shear strengthening of RC beams with textile reinforced concrete (TRC) plate. Constr Build Mater, 2010; 24 (10), s: 1928 – 1936.
- [6] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

Otrzymano 17.05.2015 r.

**Tabela 2. Porównanie wyników nośności granicznych**

*Table 2. Comparison of the results of shear capacity*

Belka	$\rho_f$ [%]	$\varepsilon_{fu}$ [-]	$V_c$ [kN]	$V_s$ [kN] dla $\alpha = 90^\circ$		$V_f$ [kN]		$V_{teor}$ [kN]	$V_{exp}$ [kN]	
				$\theta = 45^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\theta = 45^\circ$			$\theta = 30^\circ$
B1	0,0303	0,0136	43,14	$\theta = 45^\circ$	30,47	$\alpha = 90^\circ$	$\theta = 45^\circ$	9,00	82,61	128,50
				$\theta = 30^\circ$	52,71		$\theta = 30^\circ$	15,60		
B2	0,0298	0,0138	43,14	$\theta = 45^\circ$	30,47	$\alpha = 45^\circ$	$\theta = 45^\circ$	12,90	86,51	118,30
				$\theta = 30^\circ$	52,71		$\theta = 30^\circ$	17,60		
B3	0,0258	0,0137	43,14	$\theta = 45^\circ$	30,47	$\alpha = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	10,90	84,51	110,95
				$\theta = 30^\circ$	52,71		$\theta = 30^\circ$	13,90		