

BUILDER FOR THE FUTURE | BUILDER FOR THE YOUNG ENGINEERS

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.

Dorota Urbańska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Politechnika Wroclawska

OPIEKUN NAUKOWY
dr inż. **Michał Musiał**
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Politechnika Wroclawska

Materiały kompozytowe FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*) są wykorzystywane do wzmocniania konstrukcji zarówno żelbetowych, jak i murowych. W ich skład wchodzi włókna kompozytowe ułożone dwukierunkowo w formie siatki oraz zaprawa cementowa modyfikowana włóknami, które zwiększają jej wytrzymałość na rozciąganie. Do wzmocniania używane są włókna węglowe, szklane i aramidowe oraz włókna PBO (*p-Phenylene BenzobisOxazole*), które na tle pozostałych włókien charakteryzują się największą wytrzymałością na rozciąganie oraz dużym modułem sprężystości podłużnej (ok 15% większym niż włókna węglowe). Kompozyty FRCM

WZMOCNIENIE KOMOPOZYTOWE PBO-FRCM

Część 2.

W artykule opisano mechanizm pracy wzmocnienia kompozytowego PBO-FRCM poddanego rozciąganiu oraz naprężeniom ścinającym. Omówiono trójfazowy mechanizm pracy kompozytów FRCM oraz główne problemy związane z zastosowaniem tego typu systemu, czyli przedwczesne odspajanie się włókien od matrycy.

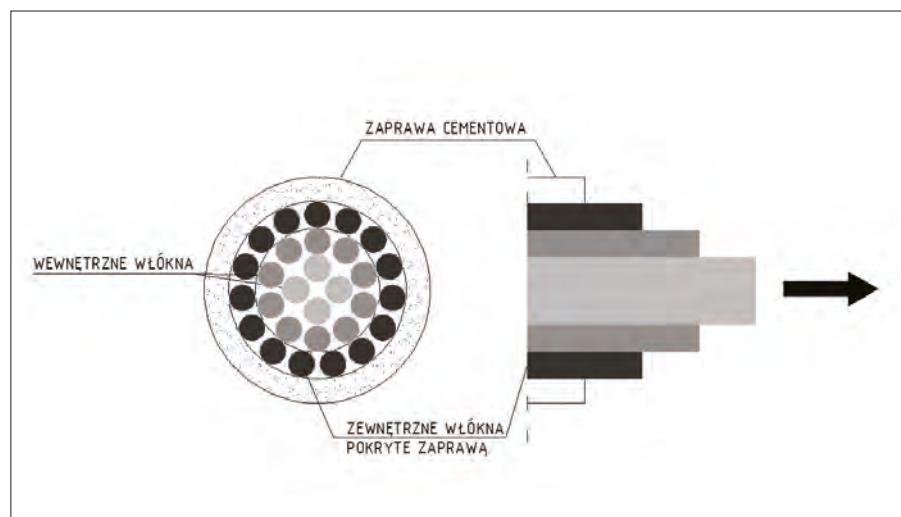
powstały w odpowiedzi na główne wady systemów FRP, jakimi jest niska odporność na wysokie temperatury, niska przepuszczalność, toksyczność i wrażliwość na promieniowanie UV. Wady te udało się wyeliminować, stosując zaprawę cementową zamiast żywicy epoksydowej. Pozwoliło to na efektywne wzmocnianie konstrukcji narażonych na oddziaływanie wysokich temperatur, oraz obiektów zabytkowych, dzięki dobrej kompatybilności zaprawy z podłożem. Jednakże zastosowanie nieorganicznej matrycy wiąże się z innymi wadami, jakimi jest niska wytrzymałość na rozciąganie i nieidealne pokrycie włókien.

Istotną różnicą między kompozytami FRCM

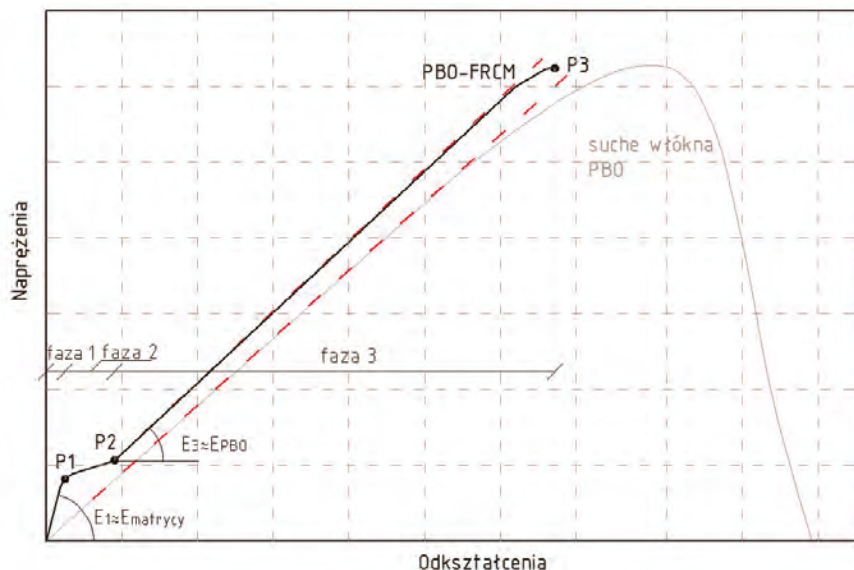
i FRP jest mechanizm zniszczenia. Dla wzmocnień FRP typowym mechanizmem zniszczenia jest odklejenie się kompozytu od powierzchni elementu z cienką warstwą podłoża lub zerwanie włókien. Dla wzmocnień FRCM obserwuje się najczęściej odspojenie włókien od zaprawy mineralnej z powodu wspomnianych wcześniej wad zaprawy cementowej. Najczęściej nie dochodzi do zerwania włókien. Z powodu występującego poślizgu i tarcia między zaprawą a włóknami system FRCM charakteryzuje się bardziej plastycznym charakterem pracy, w przeciwieństwie do FRP, gdzie zniszczenie następuje gwałtownie. Aby zapobiec przedwczesnemu odspojeniu się kompozytu i tym samym zwiększyć efektywność wzmocnień FRCM, należy stosować odpowiednie zakotwienia.

Mechanika pracy systemu PBO-FRCM poddanego rozciąganiu

Zachowanie się systemu PBO-FRCM poddanego rozciąganiu jest przedmiotem badań od kilku lat [1-6]. Badania przeprowadzono, naklejając siatkę z włókien PBO za pomocą zaprawy cementowej na betonowy lub murowany blok [1-4]. Drugi koniec paska siatki był zakotwiony w metalowych kleszczach, tak aby siła rozkładała się równo na wszystkie włókna, i cały pasek był rozciągany do momentu zniszczenia. Wartościami zmiennymi były szerokość pasków i długość ich naklejenia. Na podstawie badań określono mechanizmy zniszczenia, do których należało przede wszystkim odspojenie się kompozytu w warstwie zaprawa – włókna, rzadziej zerwanie włókien. Wykazano, że powierzchnia podłoża nie ma dużego wpływu na



Rys. 1. Efekt teleskopowy w kompozytach FRCM [3]



Rys. 2. Trójfazowy mechanizm pracy kompozytów PBO-FRCM przy rozciąganiu

mechanizm zniszczenia, ponieważ jest on ściśle powiązany z połączeniem między matrycą a włóknami [1]. Jest to główna różnica między kompozytami FRCM a FRP. W kompozytach FRP, gdzie matrycą jest żywica epoksydowa, uzyskujemy bardzo dobre połączenie między matrycą a włóknami, a do zniszczenia dochodzi w wyniku oderwania się całego kompozytu od powierzchni elementu wraz z cienką warstwą podłoża. W kompozytach FRCM nie można uzyskać tak dobrego pokrycia włókien matrycą, jak w przypadku systemów FRP, ponieważ zaprawa cementowa nie dociera do wszystkich włókien pojedynczej wiązki siatki. Zewnętrzne włókna pojedynczej wiązki są w bezpośrednim kontakcie z matrycą i są ściśle połączone ze sobą, podczas gdy wewnętrzne włókna w rdzeniu nie mają bezpośredniego kontaktu z matrycą i z powodu mniejszego tarcia może występować tu poślizg pomiędzy włóknami. To zjawisko opisywane jest w literaturze jako efekt teleskopowy (rys. 1.) [1,3].

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że zachowanie się kompozytów FRCM podczas rozciągania można opisać trójfazowo [2–6]. W pierwszej fazie materiał jest niezarysowany i kompozyt wykazuje zachowanie liniowe. Druga faza zaczyna się w momencie pojawienia się rys. Wiąże się to ze znaczącym spadkiem sztywności kompozytu i rozwojem zarysowania. Trzecia faza to moment, kiedy powstaje niewiele nowych rys, a istniejące stają się coraz szersze do momentu końcowego zniszczenia kompozytu. Tę charakterystyczną dla wzmocnień na bazie zapraw mineralnych trójfazową pracę przedstawia wykres – (rys. 2). W pierwszej fazie nachylenie wykresu odpowiada modułowi sprężystości matrycy mineralnej. Długość i nachylenie wykresu w drugiej fazie zależy od połączenia matryca – włókna i objęto-

ści włókien aktywnych w przenoszeniu naprężeń. W trzeciej fazie jedyną częścią wzmocnienia przenoszącą naprężenia jest siatka kompozytowa, a kąt nachylenia wykresu odpowiada modułowi sprężystości włókien.

Badania kompozytów PBO-FRCM przeprowadzono także w „czystej” próbie rozciągania tj. na pasku z siatki włókien PBO, który w całości pokryty był obustronnie zaprawą o grubości 5 mm [5,6]. Obydwa końce paska były zamocowane w metalowych kleszczach i poddane rozciąganiu. Badania potwierdziły trójfazowość pracy kompozytów FRCM. Faza druga rozpoczynała się w momencie przekroczenia naprężeń odpowiadających wytrzymałości matrycy cementowej na rozciąganie, a nachylenie wykresu w trzeciej fazie było równe modułowi sprężystości suchych włókien PBO.

Mechanika pracy systemu PBO-FRCM przy naprężeniach ścinających

System PBO-FRCM stosowany jako wzmocnienie belek żelbetowych na ścinanie znajduje się w złożonym stanie naprężenia, ponieważ oprócz rozciągania występują także naprężenia ścinające. Efektywność zastosowania kompozytów FRCM jako wzmocnienia belek na ścinanie była przedmiotem badań zarówno belek o przekroju prostokątnym [7, 8], jak i teowym [9, 10]. Dla belek wzmocnionych systemem PBO-FRCM mechanizm zniszczenia polegał na odspajaniu się siatki PBO, któremu towarzyszył rozwój rys ukośnych. W żadnej z belek nie nastąpiło rozerwanie włókien siatki PBO. Przedwczesne odspajanie siatki prowadzi do niepełnego wykorzystania właściwości mechanicznych włókien PBO. Aby zwiększyć efektywność wzmocnień FRCM, należy stosować zakotwienie siatek PBO, które mogą zapobiec przed-

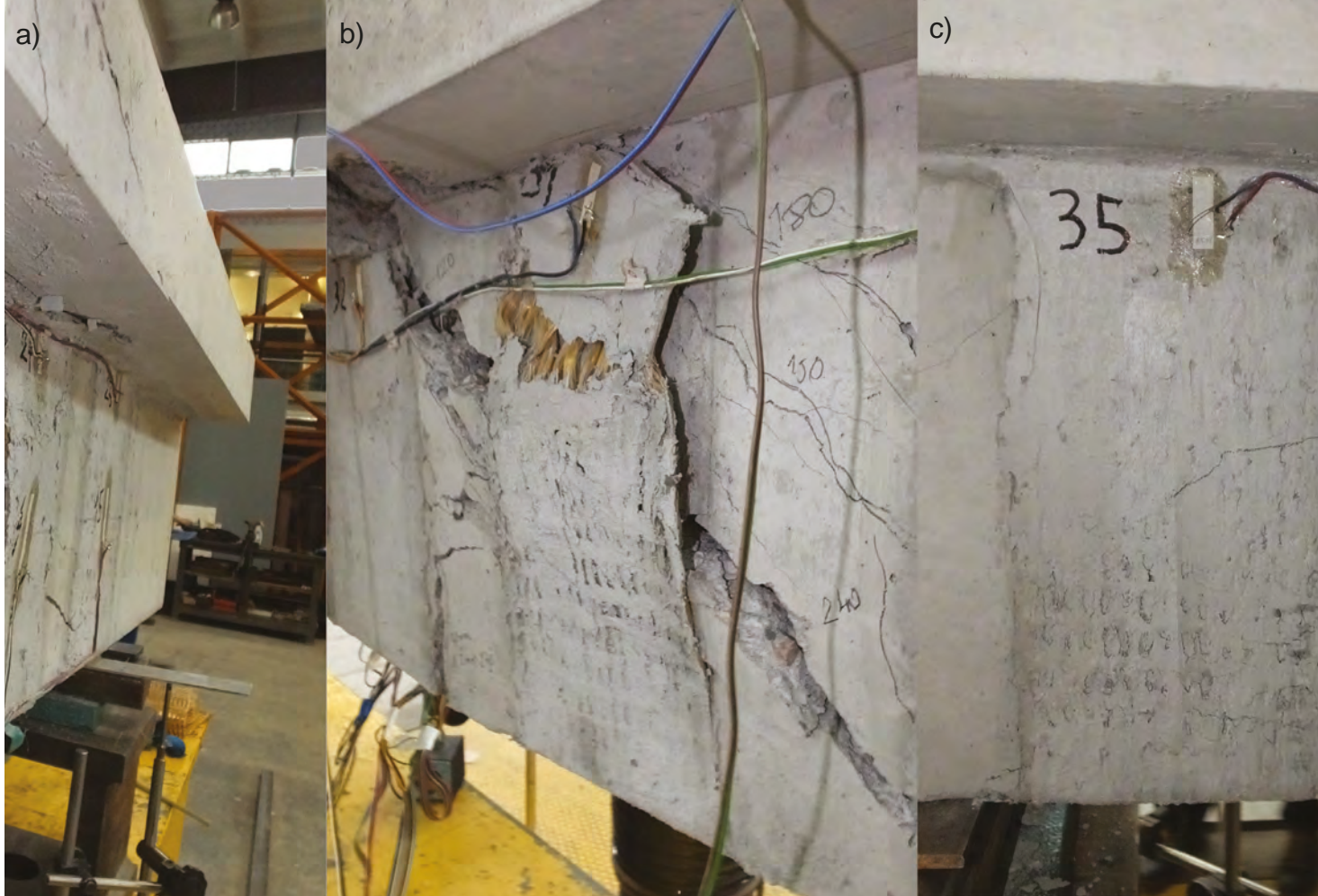
wczesnemu odspajaniu się włókien i tym samym zwiększyć wykorzystanie nośności siatki PBO. W przeprowadzonych badaniach na belkach prostokątnych z zakotwieniem [8] wykazano, że w porównaniu do belek bez zakotwienia są one zdolne do przeniesienia większych obciążeń, a włókna PBO są efektywniej wykorzystane (wykazują większe odkształcenia). Pomimo zastosowania zakotwienia nie udało się osiągnąć zniszczenia ze względu na zerwanie włókien PBO. Do zniszczenia, podobnie jak w belkach bez zakotwienia, dochodzi w wyniku odspojenia włókien od matrycy i rozwoju rysy ukośnej.

W badaniach na belkach wzmocnionych na ścinanie w systemie PBO-FRCM bez zakotwienia maksymalne odkształcenia kompozytu wyniosły 3,5‰ [7], co odpowiada około 20% wytrzymałości włókien PBO na rozciąganie. Maksymalne odkształcenia kompozytu w badaniach belek z zakotwieniem wyniosły 8,23‰, co oznacza wykorzystanie 47% jego całkowitej nośności. Do momentu powstania rys ukośnych kompozyty PBO-FRCM zachowują się liniowo, a przyrost odkształceń jest bardzo mały. W momencie przekroczenia nośności betonu na ścinanie dochodzi do powstawania rys ukośnych i nagłego przyrostu odkształceń w strzemiach PBO, które włączają się w pełni do współpracy w przenoszeniu sił ścinających i zaczynają zachowywać się nieliniowo. Podobnie jak w przypadku kompozytów PBO-FRCM, w wyniku niedokładnego pokrycia wszystkich włókien zaprawą występuje efekt teleskopowy i poślizg. Do odspojenia siatek dochodzi w warstwie włókna/zaprawa, co potwierdza, że neutralnym punktem w tego typu kompozytach jest połączenie wewnątrz kompozytu, między włóknami a zaprawą. Na zdjęciach (rys. 3.) przedstawiono charakterystyczne dla wzmocnień FRCM zniszczenie.

Wnioski

Wzmocnienia konstrukcji żelbetowych przy użyciu włókien PBO łączonych z betonem za pomocą zaprawy mineralnej są coraz częściej przedmiotem badań naukowych oraz zastosowań praktycznych. System ten jest odporny na wysokie temperatury, wilgotne podłoże, łatwy w aplikacji i nietoksyczny, co czyni go dobrą alternatywą dla powszechnie stosowanych wzmocnień FRP, szczególnie w konstrukcjach narażonych na wysokie temperatury oraz w obiektach zabytkowych.

Należy jednak pamiętać, że kompozyty FRCM znacznie różnią się mechanizmem pracy od kompozytów FRP. Zaprawa mineralna użyta jako matryca nie jest w stanie zapewnić tak dobrego połączenia wszystkich włókien, jak żywica epoksydowa. Dochodzi tutaj do zjawiska poślizgu i efektu teleskopowego oraz bardziej plastycznego charakteru pracy całego elementu. Do zniszczenia dochodzi zazwyczaj w wyniku odspojenia się kompozytu w warstwie zaprawa/włókna. Z uwagi na opisany charakter pra-



Rys. 3. Belki po zniszczeniu; a) odspojenie paska PBO, b) odspojenie paska PBO i widoczny poślizg włókien, c) poślizg włókien na warstwie zaprawy

cy odpowiednie zakotwienie kompozytu jest ważnym elementem, który zapobiega przedwczesnemu odspojeniu się siatki. System PBO-FRCM z powodzeniem może być stosowany do wzmacniania elementów konstrukcyjnych, należy mieć jednak na uwadze wspomniane w artykule aspekty wynikające z mechanizmu pracy takiego wzmocnienia.

Bibliografia

- [1] Antino T.D., Carloni C., Sneed L.H. & C. Pellegrino. 2014. Matrix-fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach, C Engineering Fracture Mechanics, 2014; 117, pp.: 94–111.
- [2] Hartig J, Jesse F, Schickantz K, Haubler-Combe U. Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of textile reinforced concrete specimens. Mater Struct 2012; 45, pp.433–46.
- [3] Carozzi F.G., Poggi C. A cohesive interface crack model for the matrix-textile debonding in FRCM composites. Compos Structures. 2016; 143, pp. 230–241.
- [4] D'Antino T., Sneed L.H., Carloni C., Pellegrino C. Influence of the substrate characteristics on the bond behavior of PBO FRCM-concrete joints. Constr Build Mater, 2015; 10, pp. 838–850.
- [5] Carozzi F.G., Poggi C. Mechanical properties and debonding strength of fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for masonry strengthening. Compos Part B-Eng. 2015; 70, pp. 215–230.
- [6] Bertolesi E., Carozzi F.G., Milani G, Poggi C. Numerical modelling of Fabric Reinforce Cementitious Matrix composites (FRCM) in tension. Constr Build Mater, 2014; 70 , pp. 531–548.
- [7] Trapko T., Urbańska D., Kamiński M. Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites, Compos Part B-Eng. 2015; 80, pp. 63–72.
- [8] Ombers L. Structural performances of reinforced concrete beams strengthened in shear with a cement based fiber composite material. Compos Struct, 2015; 12, pp. 2316–329.

[9] Tzoura E. & Triantafillou T. C. 2016. Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets, Materials and Structures, 49 (2016), pp. 17–28.

[10] Brückner A. & Ortlepp R. & Curbach M. 2007. Anchoring of shear strengthening for T-beams made of textile reinforced concrete (TRC), Materials and Structures, 2008; 41, pp. 407–418.

Abstrakt. Kompozyty PBO-FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*) składają się z włókien PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*) i zaprawy mineralnej, która pełni rolę matrycy. Dzięki temu, w przeciwieństwie do kompozytów FRP, mogą być one stosowane w obiektach narażonych na oddziaływanie wysokiej temperatury. Zastosowanie zaprawy jako matrycy wiąże się jednak ze specyficzną mechaniką pracy tego systemu, która znacznie odróżnia go od systemów FRP. W badaniach przeprowadzonych na kompozytach PBO-FRCM wykazano, że w tym systemie dochodzi do poślizgu między włóknami a warstwą matrycy. Wiąże się z niedokładnym pokryciem wszystkich włókien zaprawą i występowaniem tzw. efektu teleskopowego. W artykule opisano mechanizm pracy wzmocnienia kompozytowego PBO-FRCM poddanego rozciąganiu oraz naprężeniom ścinającym. Omówiono trójfazowy mechanizm pracy kompozytów FRCM oraz główne problemy związane z zastosowaniem tego typu systemu, czyli przedwczesne odspajanie się włókien od matrycy.

Słowa kluczowe: konstrukcje żelbetowe, PBO-FRCM, ścinanie, rozciąganie, wzmocnienie kompozytowe

Abstract. WORK MECHANISM OF STRENGTHENING PBO-FRCM COMPOSITES UNDER TENSILE AND SHEAR STRESSES. PBO-FRCM (Fibre Reinforced Cementitious Matrix) composites consist of PBO fibers and mineral mortar used as a matrix. It can therefore be used in places exposed to high temperatures, contrary to the systems FRP. The use of mortar, however, is associated, however, with the specific mechanics of work of this system, which significantly differentiates it from FRP systems. The performed studies have shown that in the FRCM system slippage occurs between the fibers and the matrix layer, which is associated with inaccurate coverage of all fibers by mortar and the occurrence of "telescopic effect". The article describes the work mechanism of PBO-FRCM composites subjected to tensile and shear stresses. Three-phase work of FRCM composites and main problems associated with the use of this type of system, which is among other things premature debonding of the fibers from the matrix, were discussed.

Keywords: RC structures, PBO-FRCM, shear, tensile, composite strengthening