

PIERWSZY POLSKI MOST KOMPOZYTOWY – KONCEPCJA TECHNICZNA I BADANIA WSTĘPNE

Tomasz SIWOWSKI*, Damian KALETA**,
Maciej KULPA*, Paweł PONETA**

*) Politechnika Rzeszowska, Zakład Dróg i Mostów

**) Promost Consulting, Rzeszów

1. WSTĘP

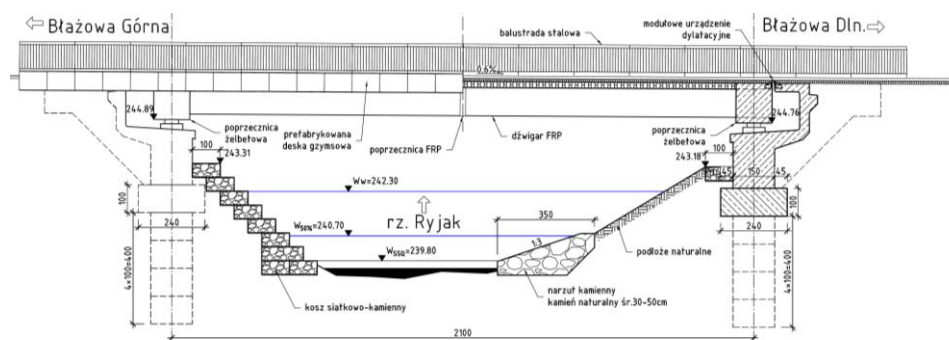
Od ponad 20 lat dzięki zastosowaniu bardzo wytrzymałych i trwałych materiałów z kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej (FRP - ang. *fibre reinforced polymers*) stało się możliwe znaczące wydłużenie trwałości obiektów mostowych [1]. Kompozyty FRP, które powstają z połączenia włókien syntetycznych oraz polimerów, charakteryzują się zdecydowanie lepszymi właściwościami mechanicznymi i fizycznymi niż powszechnie stosowane w budownictwie mostowym materiały konstrukcyjne, jak beton i stal. Z konstrukcyjnego punktu widzenia, do największych zalet kompozytów FRP należą m.in.: duża wytrzymałość na rozciąganie, duża sztywność (w przypadku kompozytu z włókien węglowych), duża wartość odkształceń granicznych, doskonała odporność na korozję oraz mała masa konstrukcji z kompozytów. Od kilkudziesięciu lat właściwości kompozytów FRP są z powodzeniem wykorzystywane w przemyśle lotniczym, samochodowym i stoczniowym. Pierwsze dziesięciolecie XXI wieku przyniosło szersze zastosowanie tych materiałów w budownictwie, w tym w budownictwie mostowym [2]. Ma to miejsce głównie w USA, Japonii, Chinach, Rosji i niektórych krajach Europy Zachodniej.

W Polsce kompozyty FRP wykorzystuje się dotychczas jedynie do wzmacniania istniejących obiektów mostowych za pomocą taśm i mat kompozytowych [3]. Do tej pory, za wyjątkiem dwukrotnego wykorzystania drobnowymiarowych, katalogowych elementów kompozytowych w specyficznych lokalizacjach [4, 5], nie zbudowano obiektu mostowego z kompozytów FRP. Dwa projekty badawcze, realizowane pod kierunkiem Mostostalu Warszawa SA we współpracy z firmą projektową Promost Consulting, Rzeszów, oraz Politechniką Rzeszowską, są pierwszą krajową próbą zmiany tego stanu rzeczy. W referacie przedstawiono koncepcję pierwszego polskiego mostu kompozytowego oraz wybrane wyniki badań jego podstawowych elementów konstrukcyjnych, panelu pomostu i skrzynkowego dźwigara głównego.

2. KONCEPCJA TECHNICZNA MOSTU

Pierwszy polski most kompozytowy powstanie w miejscowości Błazowa, woj. Podkarpackie, nad rzeką Ryjak, w miejscu istniejącego mostu stalowego z pomostem drewnianym, zbudowanego w 1958 r. Nowy most będzie miał następujące parametry użytkowe (rys.1,2):

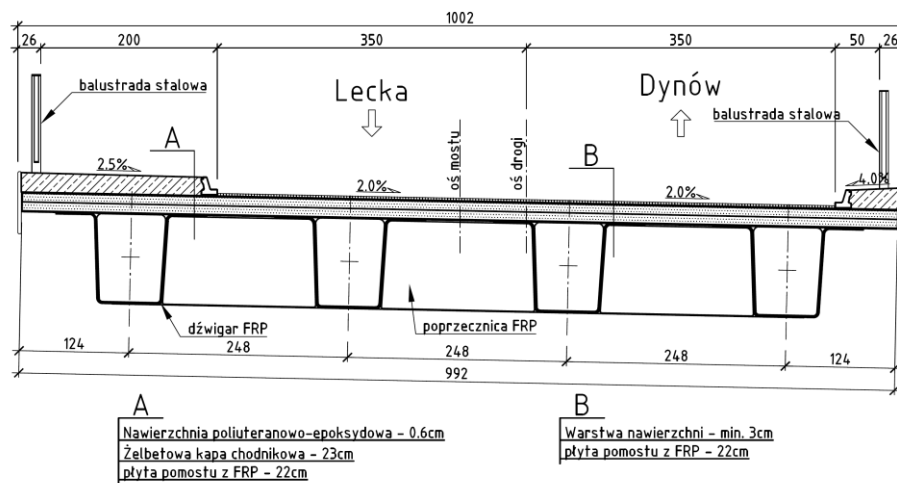
- schemat statyczny: belka swobodnie podparta;
- rozpiętość teoretyczna: 21,0 m;
- całkowita długość mostu: 22,1 m;
- całkowita szerokość pomostu: 10,0 m;
- szerokości użytkowe pomostu:
 - jezdnia: $2 \times 3,5 \text{ m} = 7,0 \text{ m}$;
 - jednostronny chodnik: 2,0 m;
 - opaska bezpieczeństwa: 0,5 m;
- wysokość konstrukcyjna: 1,2 m (w przęśle) i 1,4 m (nad podporą);
- klasa obciążenia: B wg PN-85/S-10030;
- korpusy podpór: przyczółki masywne, żelbetowe;
- posadowienie: pośrednie na studniach.



Rys. 1. Widok ogólny / przekrój podłużny mostu

Przęsło mostu będzie w całości zbudowane z kompozytów FRP. Tworzyć go będą kompozytowe dźwigary skrzynkowe, zespolone z kompozytową płytą pomostu, wykonaną w postaci paneli warstwowych. W przęśle zaplanowano 4 dźwigary główne w rozstawie 2,5 m, stężone na końcach betonowymi poprzecznkami podporowymi (zbrojonymi prętami kompozytowymi) oraz w środku rozpiętości jedną poprzeczniką przęsłową z kompozytu FRP. Pasy górne i dolne dźwigarów będą wykonane z naprzemiennie ułożonych laminatów szklanych i węglowych, zatopionych w żywicy epoksydowej. Środniki dźwigarów będą kompozytem zbudowanym z dwóch zewnętrznych laminatów szkła-

nych oraz rdzenia w postaci pianki. Panele pomostu zaprojektowano w postaci dwudzielnych płyt warstwowych (*sandwich*), łączonych ze sobą warstwą żywicy. Laminaty górny i dolny oraz trapezowe ścianki rdzeniowe zostaną wykonane z kompozytu zbrojonego tkaninami z włókien szklanych na bazie żywicy epoksydowej. Wysokość całkowita panelu wynosi 0,22 m. Panele pomostu będą zespolone z dźwigarami oraz wzajemnie pomiędzy sobą specjalnymi połączeniami, zapewniającymi pełną współodkształcalność wszystkich elementów przeszła pod obciążeniem, tj. pełną współpracę elementów w przenoszeniu obciążeń.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny przeszła mostu kompozytowego

Przędło kompozytowe będzie oparte na przyczółkach betonowych, zbrojonych prętami FRP. Przyczółki posadzone będą pośrednio na skale za pomocą studni o średnicy 1,5 m. Na każdej podporze zostaną ustawione po dwa łożyska elastomerowe.

Wyposażenie pomostu składać się będzie z:

- kap chodnikowych z betonu lekkiego, zbrojonego prętami FRP;
- prefabrykowanych desek gzymsowych oraz krawężników z betonu polimerowego;
- balustrad z kształtowników pultruzyjnych FRP lub płaskowników stalowych;
- modułowych urządzeń dylatacyjnych;
- nawierzchni jezdni z betonu modyfikowanego PCC lub asfaltu modyfikowanego żywicą.

Na potrzeby projektowania mostu wykonano pełny model numeryczny konstrukcji przeszła. Model odwzorowuje geometrię i pracę przeszła

w poszczególnych etapach jego budowy. Model numeryczny jest klasy $(e2+e3)/(p3)$. Elementami powłokowymi odwzorowano panele pomostu, poszczególne ścianki dźwigarów głównych, żeber oraz poprzecznicę przęsłowej. Elementami bryłowymi odwzorowano betonowe poprzecznicę podporowe. Dane materiałowe kompozytów FRP, tworzących pomost i dźwigary przyjęto na podstawie badań laboratoryjnych laminatów węglowych i szklanych, wykonanych w ramach realizacji projektów badawczych. Wizualizację mostu w widoku i przekroju pokazano na rys.3.



Rys. 3. Wizualizacja mostu

3. BADANIA WSTĘPNE POMOSTU

We wstępnym projektowaniu geometrii pomostu założono, że panel oparty na belkach głównych przęśla o typowym rozstawie ok. 2,5 m musi przenieść obciążenie normowe typowych mostów drogowych. Na podstawie analizy piśmiennictwa nt. wcześniejszych zastosowań warstwowych pomostów kompozytowych zaprojektowano do badań panele pomostów o trzech różnych przekrojach poprzecznych (rys.4).



Rys. 4. Panele kompozytowe badane w fazie wstępnej

Dla każdego z tych rozwiązań konstrukcyjnych wykonano panel pomostu o wymiarach w planie 2,40 x 1,10 m. Grubość paneli wahała się od 0,23 do 0,25

m, a różnice były spowodowane względami technologicznymi, związanymi z indywidualnym sposobem układania włókien przy wytwarzaniu poszczególnych paneli.

Celem wstępnych badań wytrzymałościowych było określenie sztywności i nośności granicznej poszczególnych rodzajów paneli pomostu kompozytowego. Porównanie tych charakterystyk pozwoliło na wybór najlepszego rozwiązania konstrukcyjnego panelu do dalszych badań. Wyniki badań służyły także do walidacji modeli numerycznych, przeznaczonych do optymalizacji materiałowej i konstrukcyjnej pomostów oraz do późniejszego projektowania mostu.

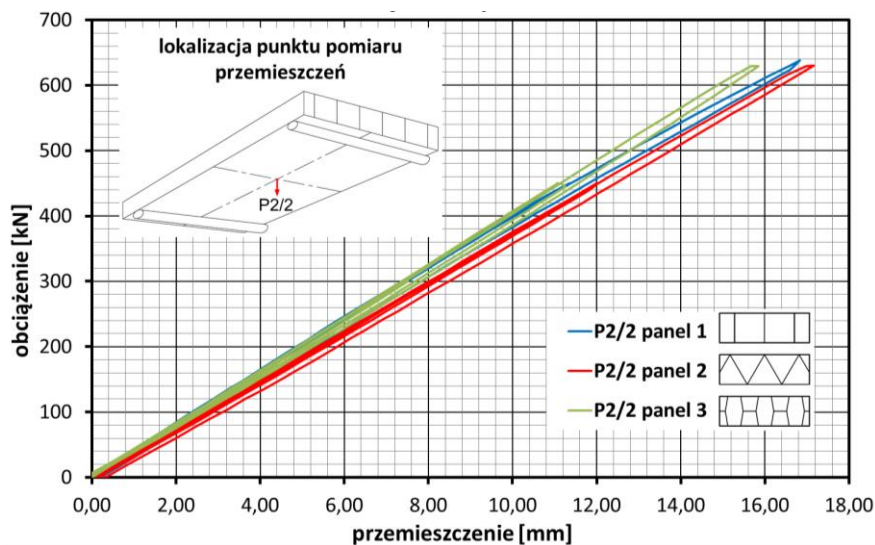
Badania wytrzymałościowe paneli zostały wykonane w akredytowanym laboratorium WBiIŚ PRz. Panele pomostu o rozpiętości teoretycznej 2,40 m podparto swobodnie na łożyskach. Zastosowano obciążenie testowe w postaci pojedynczej siły skupionej, przyłożonej w środku rozpiętości panelu, o maksymalnej wartości 630 kN i powierzchni nacisku 400×400 mm (rys.5). Jest to obciążenie punktowe ponad 4-krotnie przekraczające wartość obciążenia charakterystycznego kołem pojazdu LM1 według normy PN-EN 1991-2 ($Q_k/2=150$ kN) [6].



Rys. 5. Panel I podczas badań wytrzymałościowych (po lewej) oraz widok przyłożenia obciążenia skupionego na górnej powierzchni panelu (po prawej)

Podczas badań wytrzymałościowych żaden z paneli nie uległ zniszczeniu, nie zaobserwowano także żadnych uszkodzeń kompozytów FRP. Zależność obciążenie-przemieszczenie dla wszystkich trzech paneli pomostu przedstawiono na rys. 6. Maksymalne ugięcie paneli dla $P_{max}=630$ kN wynosiło 16,7 mm, 17,2 mm oraz 15,8 mm, odpowiednio dla panelu I, II i III. Natomiast odpowiednie przemieszczenia dla charakterystycznego obciążenia normowego wynosiły 3,98 mm ($L_k/610$), 4,09 mm ($L_k/587$) oraz 3,76 mm ($L_k/638$), i w każdym przypadku były znacznie mniejsze niż przyjęta wartość dopuszczalna $L_k/250$. Mak-

symalne odkształcenia laminatu dolnej powierzchni paneli dla $P_{\max}=630$ kN wynosiły odpowiednio 3,86‰, 3,77‰ oraz 4,16‰ dla paneli I-III, co stanowiło odpowiednio 21%, 20% oraz 22% wartości granicznej dla wytworzonego kompozytu FRP (18,75‰).



Rys. 6. Porównanie przemieszczeń w środku rozpiętości poszczególnych paneli

Jak wynika z przeprowadzonych badań pomostu, wszystkie trzy panele pracowały sprężysto pod obciążeniem pojedynczą siłą skupioną do wartości $P_{\max}=630$ kN, tj. ponad 4-krotnie większej od wartości obciążenia normowego. Zarówno ugięcia paneli jak również poziom odkształceń kompozytu były bardzo małe, znacząco mniejsze od wartości przyjętych za dopuszczalne. Pozwala to na podjęcie prac optymalizacyjnych pomostu w zakresie rozwiązań konstrukcyjnych i budowy materiałowej. Porównując jednak trzy badane rozwiązania można stwierdzić, że najlepszą charakterystykę wytrzymałościową miał panel III.

Kolejną fazą badań będzie opracowanie i wytworzenie panelu kompozytowego w pełnej skali (o powierzchni ok. $5,5 \times 2,0$ m), zoptymalizowanego pod kątem konstrukcyjnym i materiałowym. Planuje się wykonanie badań wytrzymałościowych paneli pod pełnymi układami obciążeń normowych oraz przeprowadzenie badań dynamicznych i zmężeńowych.

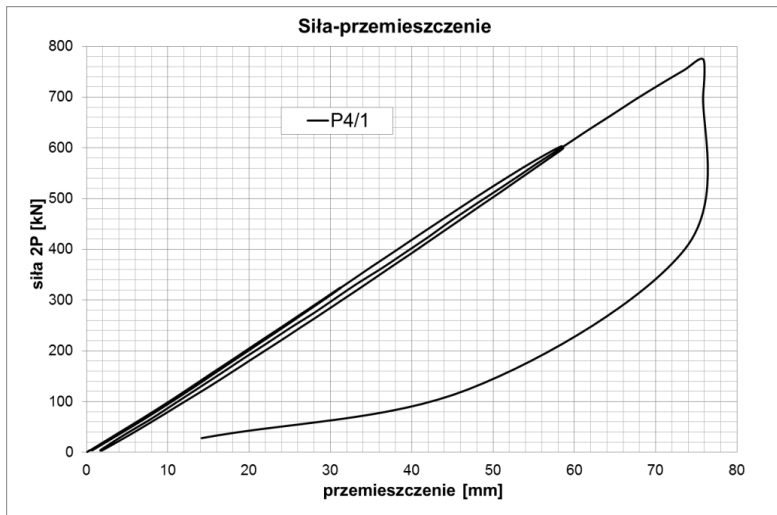
4. BADANIA WSTĘPNE DŹWIGARA

Do wstępnych badań wytrzymałościowych zaprojektowano dźwigar o rozpiętości teoretycznej 12,0 m i długości całkowitej 13,5 m [7]. Model dźwigara poddano kompleksowym badaniom statycznym na stanowisku badawczym w akredytowanym laboratorium WBiŚ PRz (rys.7). Celem badań była ocena zachowania dźwigara pod obciążeniem użytkowym oraz walidacja modelu numerycznego MES, służącego do projektowania mostu. W ostatnim etapie badań dźwigar obciążono do zniszczenia w celu wyznaczenia jego nośności granicznej oraz identyfikacji postaci zniszczenia.

Dźwigar obciążono statycznie przyjmując schemat czteropunktowego zginania. Rozstaw osiowy sił skupionych wynosił 2,0 m. Obciążenie realizowano za pomocą dwóch siłowników, których nacisk był rozłożony na powierzchnię kontaktu z dźwigarem na powierzchni panelu (pasa) górnego 1,60 x 0,30 m. Obciążenie skupione od siłowników było rozkładane przez sztywne belki stalowe, ułożone na warstwie twardej gumy, zapewniającej równomierny rozkład obciążenia na powierzchnię paneli pasa górnego (rys.7). Dźwigar obciążano statycznie w kilku fazach (m.in. na poziomie obciążeń użytkowych) aż do jego zniszczenia.



Rys. 7. Badania dźwigara kompozytowego pod obciążeniem statycznym



Rys. 8. Wykres przemieszczeń dźwigara w środku rozpiętości pod obciążeniem 2P

Na rys.8 pokazano wykres przemieszczeń pasa dolnego dźwigara w środku rozpiętości. Dźwigar pracował całkowicie sprężysto aż do zniszczenia, które nastąpiło przy obciążeniu $2P = 774$ kN. Zniszczenie dźwigara było nagłe, gwałtowne, i wystąpiło w strefie ściskanej dźwigara (w panelu pomostu) na odcinku stałego momentu zginającego, w odległości ok. 0,55 m od środka rozpiętości dźwigara. W pierwszej kolejności nastąpiła delaminacja części panelu i jego odklejenie od pasów górnych dźwigara, a następnie deformacja pasów górnych dźwigara, lokalna utrata stateczności jego środników bezpośrednio pod obciążeniem oraz odspojenie zewnętrznych żeber pionowych w tym samym przekroju (rys.9). W momencie zniszczenia maksymalne naprężenie w pasie dolnym dźwigara było równe około 26% wytrzymałości charakterystycznej laminatu węglowego na rozciąganie (tj. 332 MPa).



Rys. 9. Postać zniszczenia dźwigara

Dokładna analiza lokalizacji inicjacji zniszczenia dźwigara wykazała, że wystąpiło ono w połączeniu poprzecznym sąsiadujących paneli pomostu. Połączenie to okazało się najsłabszym fragmentem dźwigara skrzynkowego, a jego nagłe zniszczenie wywołało szybko postępującą destrukcję kompozytu FRP w pasach, środku i żebrach dźwigara. Należy jednak zaznaczyć, że badany dźwigar miał inny rodzaj pomostu, niż opisany w p.3. Uzyskana w badaniach nośność graniczna dźwigara ($M_n=1965$ kNm) była ponad 3-krotnie większa od charakterystycznego momentu zginającego, na który dźwigar zaprojektowano. Wyznaczony doświadczalnie poziom bezpieczeństwa jest wystarczający do pozytywnej oceny konstrukcji dźwigara w aspekcie potencjalnego zastosowania w projektowanym moście drogowym. Jednocześnie duży zapas nośności oraz nietypowa postać zniszczenia wskazują na konieczność podjęcia prac nad optymalizacją, zarówno materiałową, jak również konstrukcyjną dźwigara.

5. PODSUMOWANIE

W referacie opisano wstępne wyniki dotychczasowych prac koncepcyjnych, projektowych i badawczych, realizowanych przez konsorcjum kierowane przez Mostostal Warszawa SA, mających na celu wdrożenie do polskiego mostownictwa innowacyjnych drogowych mostów kompozytowych. Przeprowadzone badania wykazały, że prototypowy pomost i dźwigar kompozytowy mają bardzo dużą sztywność i nośność oraz cechują się sprężystą pracą aż do ich zniszczenia. Wyężenie kompozytów FRP przy zniszczeniu elementów osiągnęło zaledwie 20-35% wytrzymałości charakterystycznej materiałów, co świadczy o dużym

potencjale optymalizacyjnym zaprojektowanych konstrukcji. Modyfikacja i optymalizacja materiałowo-konstrukcyjna pomostu i dźwigara zostanie wykonana za pomocą modeli numerycznych, które zostały zweryfikowane na podstawie opisanych wstępnych badań wytrzymałościowych. Modele numeryczne zostaną również wykorzystane do projektu przęsła mostu drogowego, którego wybudowanie będzie docelowym rezultatem jednego z realizowanych projektów badawczych.

Opisane w referacie badania zostały zrealizowane w ramach przedsięwzięcia pilotażowego *Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demontażowej DEMONSTRATOR+* pt.: „COMBRIDGE – Innowacyjny most drogowy z kompozytów FRP” (umowa nr UOD-DEM-1-041-/001), oraz częściowo z krajowego projektu badawczego nr 6 ZR7 2009 C/07341 pt.: „Opracowanie technologii wytwarzania i wdrożenie kompozytowych kładek dla pieszych”. Oba projekty są realizowane przez konsorcja naukowe pod kierunkiem Mostostalu Warszawa SA oraz są współfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

1. Jayaraman K., Xu X.W. Life cycle assessment of products made of composite materials. *International Journal of Product Lifecycle Management* 4 (2009) 11-22.
2. Keller T. Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. *Structural Engineering Documents IABSE* 7 (2003).
3. Siwowski T., Radomski W. Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. *Inżynieria i Budownictwo* 54 (1998) 382 – 388.
4. Zobel H., Karwowski W., Wróbel M. Kładka z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknem szklanym. *Inżynieria i Budownictwo* 59 (2003) 107-108.
5. Grotte B., Karwowski W., Mossakowski P., Wróbel W., Zobel H., Żółtowski P. Stalowa łukowa kładka dla pieszych z podwieszonym pomostem z kompozytów polimerowych nad drogą S-11 pod Kórnikiem. *Inżynieria i Budownictwo* 65 (2009) 69-73.
6. PN-EN 1991-2:2007. Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
7. Poneta P., Kulpa M., Własak L., Siwowski T. Koncepcja i badania innowacyjnego dźwigara mostowego z kompozytów FRP. *Inżynieria i Budownictwo* 70 (2014) 147-151.

**THE FIRST POLISH FRP COMPOSITE BRIDGE
- TECHNICAL CONCEPT AND INITIAL RESEARCH**

Summary

The CFRP composite materials due to their excellent mechanical properties are more and more often used in civil engineering. In recent more than twenty years one could have observed f.e. much more wider application of FRP in bridge construction. The main goal of the research project described in the paper, carried out by the science-business consortium, was to develop and demonstrate FRP composite bridge span, including their conceptual technical design and structural testing on full scale models. The objective of the paper is the development and research on a new FRP bridge deck panel and main girder, both fabricated by VARTM manufacturing technique. The reduced scale prototype panel and girder were tested to evaluate their stiffness and ultimate carrying capacity as well as modes of failure. The bridge span elements met the prescribed serviceability and safety criteria and are likely to be implemented on-site soon. The output of the research project gives a very promising future for the FRP girder application in bridge engineering.