

dr hab. inż. Tomasz Siwowski*, prof. PRz.
mgr inż. Maciej Kulpa*
mgr inż. Paweł Poneta**

Badania nad zastosowaniem kompozytów FRP do budowy mostów w Polsce

Research works on FRP composite application for bridge construction in Poland

Streszczenie. Głównym celem przedstawionych badań jest opracowanie i wdrożenie kompozytowych elementów obiektów mostowych, tj. panelu pomostu i dźwigara mostowego wytworzonych z kompozytów FRP metodą infuzji (VARTM). Określono nośność i sztywność obu elementów mostowych oraz ich zachowanie pod obciążeniem użytkowym i niszcącym. Panel i dźwigar spełniły założone wymagania w zakresie nośności, użyteczności oraz zapasu bezpieczeństwa i dlatego zostaną wykorzystane w budowie prototypowego obiektu mostowego.

Słowa kluczowe: kompozyty FRP, infuzja (VARTM), pomost mostowy, dźwigar mostowy, badanie wytrzymałościowe, stany graniczne.

Kompozyty FRP (ang. *Fibre Reinforced Polymers*) powstają z połączenia włókien syntetycznych (węglowych, szklanych, aramidowych, bazaltowych) oraz polimerów (np. żywicy epoksydowej, poliesterowej, winyloestrowej). Charakteryzują się zdecydowanie lepszymi właściwościami mechanicznymi i fizycznymi niż powszechnie stosowane w budownictwie mostowym materiały konstrukcyjne typu beton, stal, m.in. dużą wytrzymałością na rozciąganie, dużą odkształcalnością graniczną, dużą sztywnością (w przypadku kompozytów z włókien węglowych), doskonałą odpornością na korozję oraz niewielką masą. Znaczne upowszechnienie tych materiałów w budownictwie mostowym [1] nastąpiło w pierwszym dziesięcioleciu XXI w. W Polsce kompozyty FRP typu taśmy i maty wykorzystuje się głównie do wzmacniania obiektów istniejących [2]. Dotychczas nie zbudowano ani jednego obiektu mostowego o konstrukcji nośnej z kompozytów FRP z wyjątkiem drobnowymiarowych, katalogowych elementów kompozytowych w specyficznej lokalizacji [3, 4]. Pierwszą krajową próbą zmiany tego stanu są projekty badawcze, realizowane przez konsorcjum pod kierunkiem Mostostalu Warszawa SA i Politechniki Rzeszowskiej. W artykule przedstawimy wstępne wyniki prac badawczych nad opracowaniem i wdrożeniem do polskiego mostownictwa kompozytowego panelu pomostu oraz zespolonego z nim dźwigara mostowego, stanowiących pełnowartościową alternatywę powszechnie stosowanych przeseł mostowych ze stali i betonu.

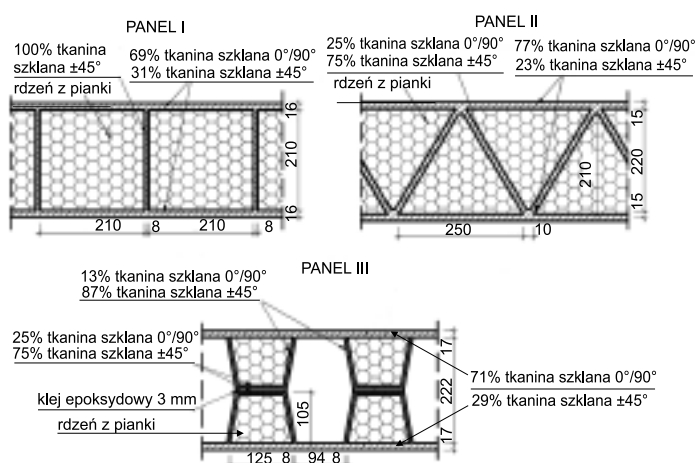
Koncepcja i badania kompozytowego panelu pomostu

Dzięki doskonałym właściwościom kompozytów FRP w ciągu ostatnich lat opracowano wiele różnych systemów pomostów kompozytowych, stosowanych przy moderniza-

Abstract. The main goal of the described research projects was to develop and demonstrate FRP composite bridge members, i.e. deck panel and main girder fabricated by VARTM manufacturing technique. The load carrying capacity and the stiffness of the both bridge elements were estimated as well as their behavior under service and ultimate load. The panel and the girder fulfilled the required criteria for ultimate capacity, serviceability and safety, therefore their application in prototype bridge construction is planned.

Keywords: FRP composites, infusion (VARTM technique), bridge deck, bridge girder, failure test, limit states.

cji lub budowie obiektów inżynierskich. **Pomosty z kompozytów FRP** dzieli się, w zależności od struktury panelu, na **warstwowe** (typu sandwich) formowane zazwyczaj metodą infuzji (VARTM – ang. *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*) oraz z **kształtowników** wytwarzanych metodą pultruzji [5]. Przedmiotem prac koncepcyjnych i badań przeprowadzonych na Politechnice Rzeszowskiej były trzy panele warstwowe pokazane na rysunku 1. Formowano je z wytrzymałego na ścinanie rdzenia o małej gęstości oraz dwóch sztywnych i odpornych na zginanie arkuszy kompozytu, przyklejanych do rdzenia od góry i od spodu. Arkusze zewnętrzne paneli oraz żebra w rdzeniu wykonano z kompozytów FRP (laminatów), z żywicy epoksydowej *Araldite*, zbrojonej włóknem szklanym. Z uwagi na dwukierunkową pracę panelu pomostu zastosowano tkaniny (rowing) o gramaturze 800 i 1200 g/m² i ortogonalnie ułożonych włóknach. Grubość górnych i dolnych laminatów w panelu wynosi ok. 15 mm, a wewnętrzne uźebrowanie 6 – 8 mm. Biorąc



Rys. 1. Budowa i ukształtowanie paneli pomostowych

* Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
** Promost Consulting

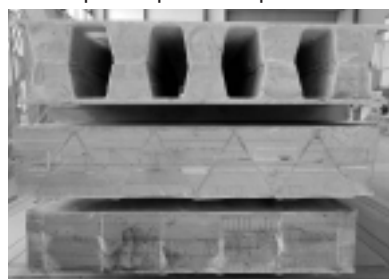
pod uwagę gramaturę tkanin, przyjęto w laminatach górnym i dolnym ok. 20 warstw włókien ułożonych w kierunku 0°/90° i 4 warstw przekładkowych o kierunku ±45°. Laminaty żeber wewnętrznych miały ok. 10 warstw tkanin ±45° oraz 2 warstwy przekładkowe 0°/90°. Trzecim materiałem użytym do budowy paneli była pianka rdzeniowa typu *Divinycell H80*. Parametry materiałowe poszczególnych materiałów paneli zestawiono w tabeli.

Parametry materiałowe laminatu szklanego i pianki rdzeniowej

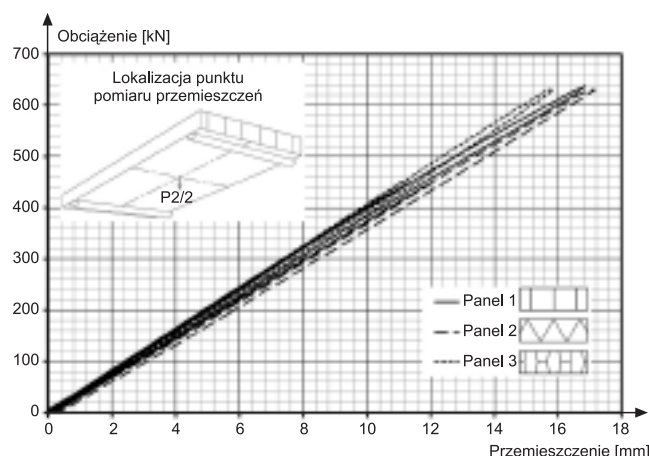
Materiał	Moduł odkształcalności podłużnej $E_x = E_y$ [GPa]	Współczynnik Poissona ν [-]	Odkształcenie przy osiągnięciu wytrzymałości na:	
			rozciąganie ϵ_t [%]	ściskanie ϵ_c [%]
Laminat szklany	24,00	0,14	18,75	11,67
Pianka rdzeniowa	0,09	0,32	26,32	15,56

Wstępnym badaniom wytrzymałościowym poddano panele o wymiarach 2,40 x 1,10 x 0,24 m, wykonane metodą infuzji jako pojedynczy element. Panele I i II całkowicie wypełniono pianką rdzeniową. Rdzenie piankowe w panelu I miały przekrój kwadratowy, a w panelu II w kształcie trójkąta równobocznego. Panel III wykonano z dwóch rozdzielnych, symetrycznych części, sklejonych w płaszczyźnie środkowej warstwą kleju epoksydowego. Jego rdzenie piankowe stanowiły ok. 50% powierzchni przekroju poprzecznego panelu. Łatwiejsza okazała się również produkcja tego panelu oraz wyższa była jego jakość w porównaniu z pozostałymi (fotografia 1).

Badania wytrzymałościowe paneli przeprowadzono w układzie swobodnie podpartym o rozpiętości teoretycznej 2,40 m. Ich celem była ocena zachowania paneli pod obciążeniem statycznym, wybór optymalnego rozwiązania oraz weryfikacja modelu numerycznego MES, służącego do projektowania pomostu. Zastosowano obciążenie w postaci pojedynczej siły skupionej o powierzchni naciśku 400 x 400 mm, przyłożonej w środku rozpiętości paneli. W miejscu przyłożenia obciążenia zastosowano 5 mm warstwę wyrównawczą z twardej gumy. Maksymalne obciążenie zostało ograniczone możliwościami systemu obciążającego i wynosiło 630 kN. Odkształcenia w kilkudziesięciu punktach pomiarowych mierzono za pomocą tensometrów, a przemieszczenia za pomocą czujników indukcyjnych. Żaden z paneli nie uległ zniszczeniu. Zależność obciążenie – przemieszczenie w przypadku wszystkich trzech paneli pomostu przedstawiono na rysunku 2. Maksymalne ugięcie paneli wyniosło 16,7 mm, 17,2 mm oraz 15,8 mm, odpowiednio dla panelu I, II i III. W przypadku maksymalnego obciążenia odkształcenie laminatu dolnego paneli stanowiło zaledwie ok. 20% wartości granicznej, podanej w tabeli. Po-



Fot. 1. Trzy panele pomostowe poddane badaniom wytrzymałościowym
[Fot. M. Kulpa]



Rys. 2. Porównanie przemieszczeń w środku rozpiętości paneli pod obciążeniem

twierdza to tezę, że w projektowaniu pomostów kompozytowych uwzględnia się zazwyczaj stan graniczny użyteczności.

Z przeprowadzonych badań wytrzymałościowych wynika, że wszystkie trzy panele pomostu kompozytowego pracowały całkowicie sprężyste pod obciążeniem pojedynczą siłą skupioną 630 kN, które znacznie przekraczało normowe obciążenie kołem pojazdu pomostów wg Eurokodu 1 [6]. Wszystkie panele wykazały dużą sztywność i nośność przy jednocześnie niewielkiej masie (ok. 100 kg/m²). Najlepsze wyniki uzyskano w przypadku panelu III, który charakteryzował się najmniejszym ugięciem ze względu na największą sztywność. W związku z tym, że ten typ panelu wyróżnia się jednocześnie lepszą technologią produkcji, a w konsekwencji wyższą jakością, dalsze badania prowadzono nad tą konstrukcją. Wyniki badań wstępnych potwierdziły możliwość dalszej optymalizacji materiałowej i konstrukcyjnej badanych paneli pomostu.

Koncepcje i badania kompozytowego dźwigara mostowego

Prototypowy dźwigar mostowy o wysokości konstrukcyjnej 1,1 m i szerokości 1,7 m (rysunek 3) zaprojektowano dla maksymalnej rozpiętości 25 m przy założeniu 4 dźwigarów w przekroju poprzecznym typowego przęsta mostowego. W górnych i dolnych pasach dźwigara zastosowano szklano-węglowe laminaty hybrydowe, natomiast w środknikach włókno szklane jako zbrojenie oraz piankę typu PVC. Skrzynkowa konstrukcja dźwigara została usztywniona przepornami wewnętrznymi i żebrami zewnętrznymi, wykonanymi także jako warstwowe elementy kompozytowe z tkanin szklanych. Elementy usztywniające przyklejono klejem epoksydowym

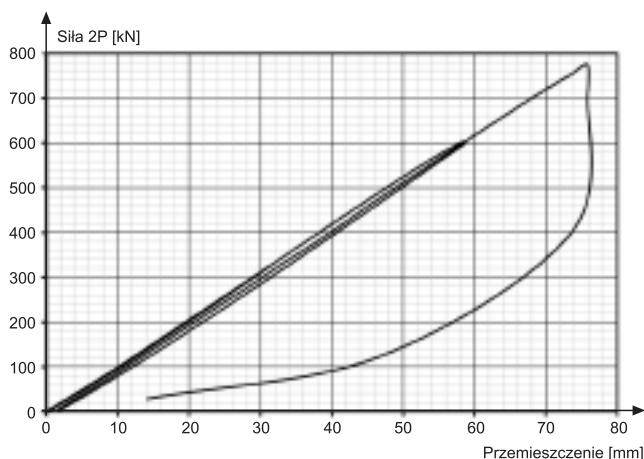


Rys. 3. Przekrój poprzeczny kompozytowego mostowego dźwigara

do dźwigara głównego. Integralną częścią dźwigara są kompozytowe panele pomostu składające się z części dolnej i górnej, zbudowanych z laminatu szklanego grubości 10 mm oraz pianki PVC grubości 60 mm. Wszystkie kompozytowe elementy konstrukcyjne dźwigara wykonano metodą infuzji (VARTM). Wyniki badań materiałowych kompozytów FRP, z których zbudowano dźwigar, podano w [7]. W przedmiotowym badaniu konstrukcję pomostu ograniczono do obciążenia ruchem pieszym.

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na modelu dźwigara o długości 13,5 m i pełnym przekroju poprzecznym. Celem badań była ocena zachowania się dźwigara i jego wybranych elementów pod obciążeniem statycznym, określenie parametrów dynamicznych dźwigara oraz weryfikacja modelu numerycznego MES, służącego do projektowania przęsła mostu. W ostatnim etapie badań dźwigar obciążono do zniszczenia w celu identyfikacji postaci zniszczenia i wyznaczenia jego nośności granicznej. Przyjęto schemat czteropunktowego zginania. Rozstaw osiowy sił skupionych wynosił 2,0 m. Obciążenie zewnętrzne wywierano przez nacisk siłowników, rozłożony na powierzchnię kontaktu z panelami pomostu na całej ich szerokości, tj. 1,60 m i na długości 0,30 m. Siły skupione od dwóch siłowników (max. 2 x 630 kN) rozkładano przez sztywne belki stalowe, ułożone na warstwie grubej i twardej gumy, zapewniającej równomierny rozkład obciążenia na powierzchnię paneli. Dźwigar obciążano w kilku fazach, aż do jego zniszczenia. Odkształcenia w kilkudziesięciu punktach pomiarowych mierzono za pomocą tensometrów, a przemieszczenia za pomocą czujników indukcyjnych.

Przemieszczenia pasa dolnego w środku rozpiętości dźwigara pokazano na rysunku 4. Dźwigar pracował sprężysto aż do zniszczenia, które nastąpiło przy obciążeniu $2P = 774$ kN. Charakter pracy dźwigara potwierdza także przebieg odkształceń kompozytu pasa dolnego dźwigara, zmierzonych w środku jego rozpiętości. W momencie zniszczenia wyężenie materiału osiągnęło zaledwie 53% wytrzymałości charakterystycznej kompozytu węglowego na ściskanie oraz 26% wytrzymałości w strefie rozciąganej. Zniszczenie dźwigara było nagłe i wystąpiło w strefie ściskanej (w panelu pomostu) na odcinku



Rys. 4. Zależność siła – przemieszczenie w środku rozpiętości dźwigara

stałego momentu zginającego, w odległości 0,55 m od środka rozpiętości dźwigara. W pierwszej kolejności nastąpiła delaminacja części panelu pomostu i odklejenie panelu od pasów dźwigara, a następnie deformacja pasów górnych dźwigara skrzynkowego, lokalna utrata stateczności jego środników bezpośrednio pod obciążeniem oraz odspojenie zewnętrznych żeber pionowych w tym samym przekroju. Pomimo nagłej i niespodziewanej postaci zniszczenia, uzyskana nośność graniczna dźwigara ($M_n = 1965$ kNm) była ponad 3-krotnie większa od charakterystycznego momentu zginającego, na który zaprojektowano dźwigar. Wyznaczony doświadczalnie poziom bezpieczeństwa jest wystarczający do pozytywnej oceny dźwigara w aspekcie potencjalnego zastosowania w projektowanym obiekcie mostowym, a duży zapas nośności oraz nieoczekiwana postać zniszczenia wskazują na konieczność podjęcia prac nad optymalizacją materiałową i konstrukcyjną dźwigara.

Podsumowanie

Badania potwierdziły możliwość wyprodukowania w warunkach przemysłowych elementów z kompozytów FRP, które nadają się do budowy obiektów mostowych. Prototypowe elementy kompozytowe mają bardzo dużą nośność, dużą sztywność oraz cechują się sprężystą pracą aż do zniszczenia. Wyężenie materiału przy zniszczeniu wyniosło tylko ok. 50% wytrzymałości charakterystycznej kompozytu FRP, co świadczy o dużym potencjale optymalizacyjnym zaprojektowanych konstrukcji. Modyfikacja i optymalizacja materiałowo-konstrukcyjna elementów mostowych zostanie wykonana za pomocą przygotowanych modeli numerycznych, które zweryfikowano na podstawie wyników badań wytrzymałościowych. Modele numeryczne wykorzystano do projektu mostu drogowego o konstrukcji kompozytowej, którego wybudowanie jest głównym celem realizowanego aktualnie projektu badawczego i jednocześnie wstępem do wdrażania innowacyjnej technologii budowy w Polsce mostów z kompozytów FRP.

Literatura

- [1] Keller T.: Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. Structural Engineering Documents, No. 7, IABSE, Zurich, 2003.
- [2] Siwowski T., Radomski W.: Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. Inżynieria i Budownictwo. Rok 54, Nr 7, 1998, s. 382 – 388.
- [3] Zobel H., Karwowski W., Wróbel M.: Kładka z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknem szklanym. Inżynieria i Budownictwo. Rok 59, Nr 2/2003, s. 107 – 108.
- [4] 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. Rok 65, Nr 1-2, 2009, s. 69 – 73.
- [5] Zobel H., Karwowski W.: Kompozyty polimerowe w mostownictwie – pomosty warstwowe. Geoinżynieria – drogi, mosty, tunele. Nr 2, 2006, s. 42 – 49.
- [6] PN-EN 1991-2:2007. Eurokod 1: Oddziaływanie 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. Rok 70, Nr 3, 2014, s. 147 – 151.