

Badania pomostów kompozytowych do zastosowań w mostach drogowych

Maciej Kulpa¹, Tomasz Siwowski²

^{1,2} Zakład Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, e-mail: ¹kulpa@prz.edu.pl, ²siwowski@prz.edu.pl

Streszczenie: Konieczność zwiększenia trwałości pomostów drogowych obiektów mostowych nadała w ostatnich latach bardzo duży impuls pracom badawczym, których celem jest stworzenie nowych rodzajów pomostów, trwałych, lekkich i łatwych w montażu, wykonanych z materiałów zaawansowanych technologicznie, takich jak np. kompozyty FRP (*fibre reinforced polymers*). W referacie przedstawiono wstępne wyniki prac badawczych nad opracowaniem pierwszego polskiego panelu pomostu kompozytowego FRP. W ramach projektu finansowanego z 7PR UE zaprojektowano, wykonano i zbadano trzy panele pomostów warstwowych (typu *sandwich*) o różnym układzie konstrukcyjnym. Na podstawie badań wytrzymałościowych paneli ustalono ich nośność i sztywność. Porównanie tych charakterystyk pozwoliło na wybór najlepszej konstrukcji panelu do dalszych prac badawczych i wdrożeniowych.

Słowa kluczowe: pomosty drogowe, kompozyty FRP, laminaty warstwowe, infuzja

1. Wprowadzenie

Trwałość typowych pomostów żelbetowych w drogowych obiektach mostowych jest kilkukrotnie krótsza od trwałości innych podstawowych elementów mostu. O trwałości pomostów obiektów mostowych w Polsce można wnioskować np. na podstawie oceny stanu mostów przeprowadzanej corocznie przez GDDKiA na sieci dróg krajowych. W sześciostopniowej skali ocen średnia ocena dla konstrukcji pomostów wyniosła w 2013 r. niewiele ponad 3.0, co oznacza stan niepokojący (tj. pomost wykazuje uszkodzenia, których nienaprawienie spowoduje skrócenie okresu bezpiecznej eksploatacji). Konieczność zwiększenia trwałości pomostów nadała w ostatnich latach bardzo duży impuls pracom badawczym i rozwojowym, których celem jest stworzenie nowych rodzajów pomostów, trwałych, lekkich i łatwych w montażu, wykonanych z materiałów zaawansowanych technologicznie, takich jak beton i stal wysokiej jakości, kompozyty FRP, stopy aluminium, a nawet poddane specjalnej obróbce drewno [1]. Oprócz znaczącego zwiększenia trwałości i zmniejszenia ogólnych kosztów utrzymania, stosowanie lekkich pomostów z nowoczesnych materiałów umożliwiła niejednokrotnie podniesienie nośności całego obiektu.

Od ponad 20 lat obserwuje się w mostownictwie rosnące zainteresowanie materiałami kompozytowymi FRP (ang. *fibre reinforced polymers*), stosowanymi do produkcji nowych elementów nośnych (dźwigary, panele pomostów) [2]. Powód tego zainteresowania jest oczywisty: trwałość (wysoka odporność na korozję i zmęczenie), duża wytrzymałość, lekkość oraz łatwość kształtowania przekroju poprzecznego elementów z kompozytów FRP [3]. Dzięki tym cechom powstało w ciągu ostatnich lat wiele różnych systemów pomostów kompozytowych, stosowanych przy modernizacji lub budowie obiektów mostowych [4].

Pomosty z kompozytów FRP dzieli się w zależności od ich struktury na dwie podstawowe grupy: pomosty warstwowe (typu *sandwich*) oraz pomosty z kształtowników wytwarzanych metodą pultruzji. Panele warstwowe są od dawna stosowane w przemyśle lotniczym, okrętowym i samochodowym, czyli tam, gdzie wymagana jest duża sztywność i wytrzymałość elementów, połączona z ich niewielkim ciężarem i wysoką trwałością. Płyty warstwowe są formowane z wytrzymałego na ścinanie rdzenia o małej gęstości oraz dwóch sztywnych i odpornych na zginanie arkuszy kompozytu, przyklejanych od góry i od spodu do materiału rdzenia. Typowy rdzeń jest wykonany zazwyczaj ze sztywnej pianki, a arkusze zewnętrzne są wykonane z mat lub rowingu z włókien szklanych lub węglowych, nasyconych żywicą epoksydową, poliestrową lub winylową. Ze względu na możliwość zmian strukturalnych zarówno materiału rdzenia jak i arkuszy podczas ich produkcji, kompozytowe konstrukcje warstwowe są bardzo łatwe do kształtowania pod specyficzne wymagania, np. dotyczące grubości lub sztywności panelu.

Prace badawcze nad opracowaniem pierwszego polskiego panelu pomostu warstwowego z kompozytów FRP do zastosowań w mostownictwie podjął Mostostal Warszawa S.A. we współpracy z Zakładem Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej w ramach projektu europejskiego *PANTURA* [5]. W referacie przedstawiono wyniki i wnioski ze wstępnych analiz konstrukcyjnych i badań wytrzymałościowych panelu pomostu warstwowego.

2. Ukształtowanie i wytworzenie paneli pomostu

2.1. Materiały

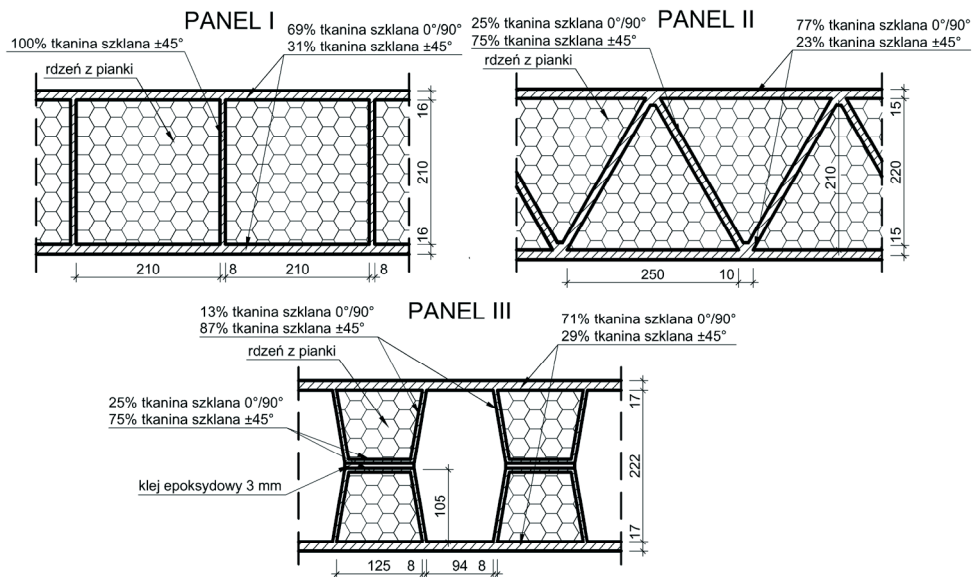
Podstawowym materiałem kompozytów FRP jest włókno zbrojące. Po wstępnych analizach zdecydowano się na zastosowanie włókien szklanych, ze względu na ich optymalny stosunek wytrzymałości do ceny. Etap projektowania kompozytu obejmował dobór liczby i orientacji włókien, co przekładało się na docelowe grubości laminatów. Z uwagi na dwukierunkową pracę panelu pomostu zastosowano tkaniny z ortogonalnie ułożonymi włóknami. Na podstawie wstępnych obliczeń przyjęto grubość górnych i dolnych arkuszy (laminatów) paneli na ok. 15 mm, a grubość laminatów wewnętrznego uzeźbrowania na ok. 6-8 mm. Biorąc pod uwagę gramatury tkanin przyjęto w laminatach górnym i dolnym ok. 20 warstw włókien ułożonych w kierunkach $0^\circ/90^\circ$ i 4 warstwy przekładkowe o kierunku włókien $\pm 45^\circ$. Laminaty żeber wewnętrznych zawierały ok. 10 warstw tkanin $\pm 45^\circ$ oraz 2 warstwy $0^\circ/90^\circ$. Matrycę kompozytu stanowiła żywica epoksydowa Araldite z utwardzaczami XB 3486 i XB 3487. Trzecim materiałem, kształtującym przekrój poprzeczny pomostu była pianka rdzeniowa typu Divinycell H80. Parametry mechaniczne materiałów wyznaczone na podstawie badań zestawiono w Tabelicy 1.

Tabelica 1. Parametry materiałowe laminatu szklanego i pianki rdzeniowej

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

2.2. Geometria

We wstępnym projektowaniu geometrii pomostu założono, że panel oparty na belkach głównych przesła o typowym rozstawie ok. 2,4 m musi przenieść obciążenie normowe wg [6] dla mostów drogowych. Na podstawie analizy piśmiennictwa nt. wcześniejszych zastosowań warstwowych pomostów kompozytowych przyjęto do badań pomosty o trzech różnych przekrojach poprzecznych i budowie pokazanej na rys.1. Dla każdego z nich wykonano panel pomostu o wymiarach 2,70 x 1,10 x 0,24 m. Grubość paneli wahała się od 0,23 do 0,25 m, a różnice spowodowane były względami technologicznymi, związanymi z indywidualną koncepcją układania włókien przy wytwarzaniu poszczególnych paneli.



Rys. 1. Ukształtowanie i budowa przekrojów poprzecznych badanych paneli

Wszystkie panele zbudowane były z laminatów szklanych oraz pianki rdzeniowej. Panele I i II były całkowicie wypełnione pianką rdzeniową pomiędzy arkuszami zewnętrznymi oraz żebrami. W panelu I rdzenie piankowe miały przekrój kwadratowy o boku 0,21 m, a w panelu II o kształcie trójkąta równobocznego o wysokości 0,21 m. Panel III został wykonywany z dwóch rozdzielnych, symetrycznych części, sklejonych warstwą kleju epoksydowego w płaszczyźnie środkowej. W tym przypadku rdzenie piankowe obejmowały ok. 50% powierzchni przekroju poprzecznego panelu.

2.3. Technologia wytworzenia paneli pomostu

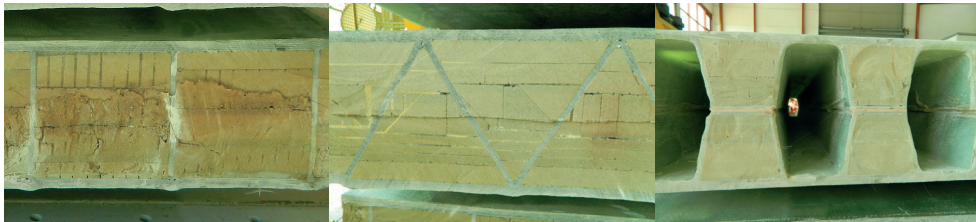
Zasadniczą kwestią była decyzja dotycząca wyboru technologii wytwarzania paneli kompozytowych. Technologia musiała pozawalać na budowę dużych elementów oraz zapewniać możliwość stosunkowo swobodnego kształtowania ich geometrii i przekroju. Na wstępnym etapie projektu istotny był również początkowy koszt sprzętu niezbędnego do wytworzenia paneli. Biorąc pod uwagę powyższe aspekty zdecydowano się na technologię infuzji próżniowej (ang. VARTM – *vacuum-assisted resin transfer molding*). Nie bez znaczenia było również dotychczasowe pozytywne doświadczenie firmy Mostostal Warszawa S.A. w stosowaniu tej technologii przy produkcji elementów kompozytowych w dużej skali [7].

Proces infuzji polega na przesycaniu żywicą pod ciśnieniem suchych tkanin, ułożonych w nieodkształcalnej formie o docelowym kształcie. Forma jest uszczelniona od góry folią, która przykrywa system rozprowadzający żywicę w całym wykonywanym elemencie (rys.2). Po całkowitym uszczelnieniu formy następuje odessanie z niej powietrza (wytworzenie próżni), a następnie zasysanie żywicy, która pod ciśnieniem jest rozprowadzana pomiędzy tkaninami i warstwami włókien. Po kilkudziesięciu minutach żywica sieciuje, tworząc ostateczny kształt elementu. Na koniec procesu wytwarzania elementu poddaje się ogrzaniu, co zwiększa wytrzymałość i trwałość kompozytu.



Rys. 2. Zastosowanie technologii infuzji próżniowej do wykonania paneli kompozytowych. Po lewej układanie tkanin zbrojących panelu II w formie, po prawej część panelu III podczas infuzji żywicą

Po wytworzeniu panele I i II wykazywały pewne odchyłki od nominalnej geometrii, zwłaszcza w pobliżu żeber wewnętrznych (rys.3). Deformacje i podłużne zgrubienia tkanin w miejscach połączenia żeber z arkuszami górnym i dolnym były nieuniknione z uwagi na odkształcenia względem siebie tkanin i pianek na wolnej, niestykającej się z formą, powierzchni panelu w momencie wytwarzania próżni. Ten problem został praktycznie wyeliminowany w panelu III. Dzięki dwuetapowej infuzji możliwe było uzyskanie płaskiej powierzchni zarówno dla dolnej, jak i górnej części panelu.



Rys. 3. Przekroje poprzeczne paneli (od lewej) I, II i III oraz widoczne deformacje w strefach połączeń żeber z arkuszami powierzchniowymi

3. Badania paneli pod obciążeniem statycznym

3.1. Opis badań

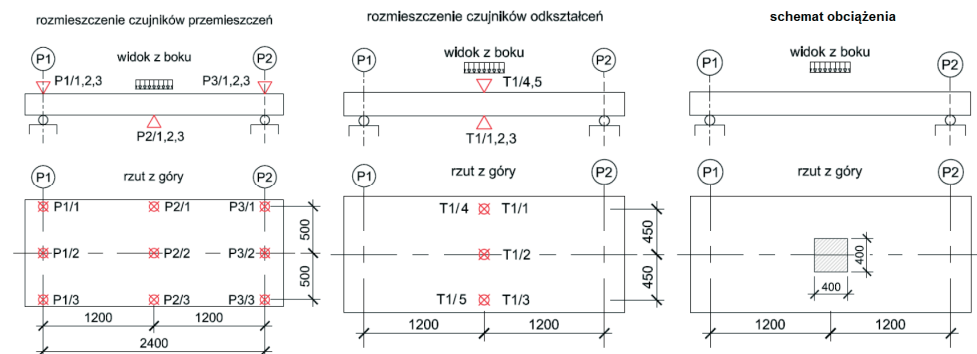
Celem wstępnych badań wytrzymałościowych było określenie sztywności i nośności granicznej poszczególnych rodzajów paneli pomostu. Porównanie tych charakterystyk pozwoliło na wybór rozwiązania konstrukcyjnego panelu do dalszych badań. Wyniki badań służyły także do walidacji modeli numerycznych paneli,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

Badania wytrzymałościowe paneli zostały wykonane w akredytowanym laboratorium Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska PRz. Panele pomostu o rozpiętości teoretycznej 2,40 m podparto swobodnie na łożyskach. Zastosowano obciążenie testowe w postaci pojedynczej siły skupionej o powierzchni nacisku 400×400 mm, przyłożonej w środku rozpiętości paneli (rys.4).



Rys. 4. Panel I podczas badań wytrzymałościowych (po lewej) oraz szczegół przyłożenia obciążenia skupionego na górnej powierzchni panelu (po prawej)

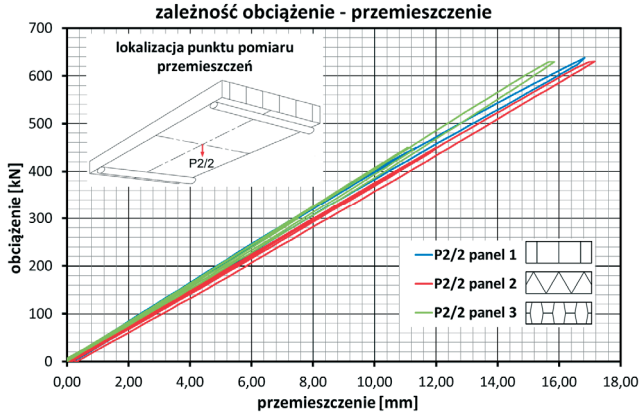
Maksymalne możliwe do uzyskania obciążenie było ograniczone możliwościami systemu i wynosiło 630 kN. Podczas badań w wybranych punktach paneli (rys.5) były mierzone przemieszczenia za pomocą czujników indukcyjnych (P) oraz odkształcenia za pomocą tensometrów elektrooporowych (T). Pomiar odbywał się w sposób ciągły, a zapisy mierzonych wielkości wykonywano z częstotliwością 1 Hz.



Rys. 5. Od lewej: rozmieszczenie czujników przemieszczeń (P), rozmieszczenie czujników odkształceń (T) oraz schemat obciążenia podczas badań wytrzymałościowych paneli

3.2. Główne wyniki badań wytrzymałościowych

Podczas badań wszystkie panele zostały obciążone maksymalną siłą 630 kN, co stanowiło 420% charakterystycznego obciążenia normowego. Zależność obciążenie-przemieszczenie dla wszystkich trzech paneli pomostu przedstawiono na rys.6, a szczegółowe wartości pomierzonych przemieszczeń w Tablicy 2. Maksymalne ugięcie w środku rozpiętości odpowiednio dla paneli I, II i III wynosiło 16,7 mm, 17,2 mm oraz 15,8 mm, co stanowiło odpowiednio 174%, 179% oraz 165% ugięcia dopuszczalnego.

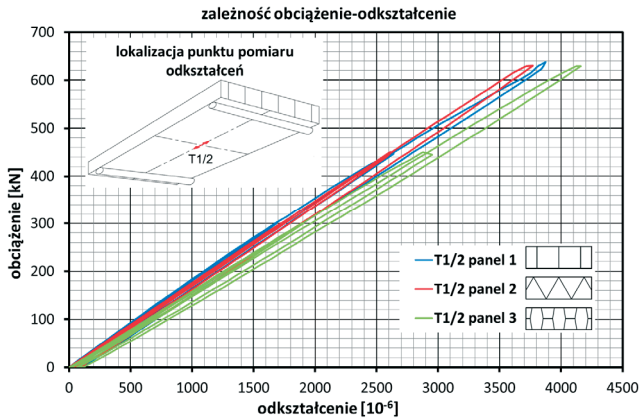


Rys. 6. Porównanie przemieszczeń w środku rozpiętości poszczególnych paneli

Tablica 2. Wartości przemieszczeń poszczególnych paneli dla $P_{\max}=630$ kN

Panel	P2/1	P2/2	P2/3	Wartość graniczna ($L_t/250$)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
I	14,86 ($L_t/162$)	16,69 ($L_t/144$)	15,08 ($L_t/159$)	9,60 ($L_t/250$)
II	16,25 ($L_t/148$)	17,16 ($L_t/140$)	16,20 ($L_t/148$)	9,60 ($L_t/250$)
III	10,73 ($L_t/224$)	15,84 ($L_t/152$)	11,04 ($L_t/217$)	9,60 ($L_t/250$)

Zależność obciążenie-odkształcenie dla wszystkich trzech paneli pomostu przedstawiono na rys.7, a szczegółowe wartości odkształceń w tablicy 3. Maksymalne odkształcenie laminatu dolnej powierzchni paneli wynosiło odpowiednio dla paneli I-III 3,86‰, 3,77‰ oraz 4,16‰, co stanowiło odpowiednio 21%, 20% oraz 22% wartości granicznej.

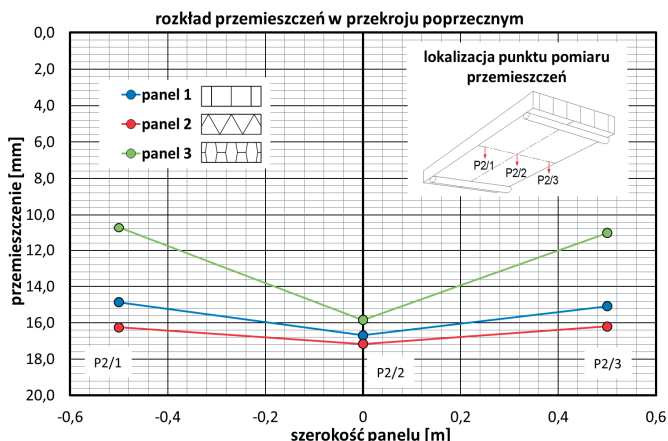


Rys. 7. Porównanie odkształceń na dolnej powierzchni laminatu w środku rozpiętości poszczególnych paneli

Tablica 3. Wartości odkształceń dolnej powierzchni laminatu poszczególnych paneli dla $P_{\max}=630$ kN

Panel	T1/1	T1/2	T1/3	Wartość graniczna
	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
I	2,82 (15%)	3,86 (21%)	2,80 (15%)	18,75
II	2,97 (16%)	3,77 (20%)	3,09 (16%)	18,75
III	2,31 (12%)	4,16 (22%)	2,56 (14%)	18,75

Z uwagi na zróżnicowany przekrój poprzeczny paneli istotnym zagadnieniem badawczym było ich zachowanie w kierunku poprzecznym. W tym celu porównano rozkład przemieszczeń paneli pod maksymalnym obciążeniem $P_{\max}=630$ kN (rys.8).



Rys. 8. Porównanie rozkładu przemieszczeń w przekroju poprzecznym poszczególnych paneli pod maksymalnym obciążeniem 630 kN

Podczas badań pod obciążeniem $P_{\max}=630$ kN żaden z paneli nie uległ zniszczeniu, wszystkie pracowały sprężysto w całym zakresie obciążenia. Najmniejsze ugięcie pod obciążeniem maksymalnym miał panel III, natomiast najmniejsze odkształcenie – panel II. Z kolei panel III miał najmniej równomierny rozkład poprzeczny sztywności i związany z nim rozkład wyężenia. Generalnie maksymalne wyężenie paneli stanowiło zaledwie ok. 20% wartości granicznej, podanej tablicy 1.

4. Wnioski i podsumowanie

Jak wynika z przeprowadzonych badań wytrzymałościowych, wszystkie trzy panele pomostu kompozytowego pracowały sprężysto pod obciążeniem pojedynczą siłą skupioną wynoszącą 630 kN. Jest to obciążenie punktowe, znacząco przekraczające obciążenie normowe według PN-EN 1991-2 [4]. Przy tym obciążeniu panele wykazywały ugięcia przekraczające założoną wartość graniczną (maksymalne przemieszczenie wynosiło $1/140 L_T$). Potwierdza to tezę, że dla pomostów kompozytowych stanem decydującym w procesie projektowym jest zazwyczaj stan graniczny użyteczności. Wszystkie panele wykazywały wysoką sztywność i nośność przy jednocześnie niewielkiej wadze (ok. 1 kN/m^2). Pod tym względem najlepiej wypadł panel III, który charakteryzował się najmniejszymi ugięciami. Wyniki badań potwierdziły możliwość dalszych optymalizacji materiałowej i konstrukcyjnej badanych paneli pomostu.

Metoda infuzji okazała się bardzo przydatna do wytwarzania kompozytów o stosunkowo dużych gabarytach. Jej zastosowanie pozwoliło na uzyskanie laminatów o prawidłowym nasyceniu przy całkowitej grubości laminatu przekraczającej 15 mm. Jednocześnie metoda infuzji przy panelach wykonywanych jednoetapowo powodowała deformacje podłużne wolnej powierzchni laminatu. Rozmiar tych imperfekcji może powodować problemy przy układaniu nawierzchni cienkowarstwowej. Problem ten został wyeliminowany w koncepcji III, gdzie panel był wykonywany dwuetapowo. Dzięki rozdzieleniu produkcji na dwa procesy infuzji możliwe było uzyskanie większej dokładności oraz lepszej jakości laminatów. Ze względu na mniejszą ilość rdzeni piankowych proces

wytwarzania panelu III był mniej czasochłonny niż w koncepcji I i II, które wymagały ułożenia bardziej skomplikowanych i liczniejszych warstw tkanin i pianek rdzeniowych.

Podsumowaniem tej fazy badań jest wybór najlepszej koncepcji na podstawie badań wytrzymałościowych, lecz także na podstawie czynników ekonomicznych (koszt materiałów, koszt wytworzenia) i technologicznych (czasochłonność, ograniczenie deformacji w procesie produkcji). Po szczegółowej analizie panel III okazał się najlepszą z badanych koncepcji, pomimo nieznacznie gorszej charakterystyki w zakresie sztywności poprzecznej. Ten rodzaj pomostu został wybrany do dalszych badań. Czynnikiem, który bardzo silnie zaważył na wyborze panelu III były znacząco mniejsze imperfekcje technologiczne, równość powierzchni laminatów zewnętrznych oraz jednostkowy koszt produkcji.

Kolejną fazą badań będzie opracowanie i wytworzenie zoptymalizowanego pod kątem materiałowym i konstrukcyjnym panelu kompozytowego w pełnej skali (ok. $5,5 \times 2,0$ m) i jego badania pod obciążeniem normowym, zarówno statycznym jak i dynamicznym.

Literatura

- 1 Siwowski T., Pomosty drogowe. Część I - Magazyn Autostrady, nr 10/2006, wydanie specjalne – jesień 2006, pn.: Mosty – konstrukcja, wyposażenie, utrzymanie, s. 30-38, część II - Magazyn Autostrady, nr 11/2006, s. 67-72.
- 2 Alagusundaramoorthy P., Harik M., Choo C., Structural Behavior of FRP Composite Bridge Deck Panels. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 11, No. 4, July/August 2006, pp. 384-393.
- 3 Kumar P., Chandrashekhara K., Nanni A., Structural performance of a FRP bridge deck. *Construction and Building Materials* 18, 2004 r., pp. 35-47
- 4 Zobel H., Karwowski W., Kompozyty polimerowe w mostownictwie – pomosty wielowarstwowe. *Geoinżynieria - drogi, mosty, tunele*, Nr 2, 2006, s. 42- 49.
- 5 <http://www.pantura-project.eu>.
- 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*, 3/2014 r, s. 147-151.

Research on FRP decks for road bridge applications

Maciej Kulpa¹, Tomasz Siwowski²

^{1,2} *Department of Road and Bridges, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Rzeszow University of Technology, e-mail: ¹kulpa@prz.edu.pl, ²siwowski@prz.edu.pl*

Abstract: The growing need of durability enhancement for road bridge decks has recently caused the big impulse for research on new, durable, lightweight and easy to handle bridge decks, made of advanced materials, f.e. FRP (*fibre reinforced polymers*). The initial results of research on the first Polish FRP bridge deck have been presented in the paper. In the frame of UE 7FP the three structural solutions of sandwich FRP bridge deck have been elaborated, produced and tested under static load. On the basis of test results the stiffness and carrying capacity of panels have been estimated and the best solution for further research has been chosen.

Keywords: composites, road decks, infusion, laminates, fiberglass.