

Lech WŁASAK¹
Jerzy JURCZUK²
Mostostal Warszawa S.A.

NOWE KONCEPCJE KOMPOZYTOWYCH POMOSTÓW DROGOWYCH

STRESZCZENIE

W pracy zaprezentowano koncepcje trzech drogowych, prefabrykowanych pomostów kompozytowych, stworzonych w dziale badawczo-rozwojowym firmy Mostostal Warszawa. Do ich użycia użyto żywicy epoksydowej zbrojonej włóknami (szyte tkaniny szklane i węglowe) oraz rdzeni z pianek. Panele warstwowe wykonano w jednym procesie - metodą infuzji lub w dwóch procesach: infuzji i sklejania ze sobą, uzyskanych tą drogą elementów.

Potwierdzono możliwość stosowania tej metody do produkcji warstwowych płyt pomostowych, przedstawiono napotkane problemy oraz doświadczenia zebrane podczas wykonywania ich prototypowych modeli.

SŁOWA KLUCZOWE: pomost drogowy, panel warstwowy, kompozyt FRP, infuzja

1. WSTĘP

W Polsce 30% mostów drogowych jest użytkowana od ponad 50 lat [1]. W tym czasie zwiększyło się natężenie ruchu drogowego oraz uległy zmianie wytyczne i normy do projektowania obiektów mostowych. Z tego powodu współczesne przeprawy są konstruowane z myślą o dużo większych obciążeniach niż starsze konstrukcje, a te ostatnie należy często dostosowywać do nowych wymagań. Drogą prowadzącą do tego celu jest zarówno wzmacnianie lub wymiana istniejącego ustroju nośnego jak i obniżenie masy własnej obiektu lub jego elementów składowych.

W mostach, o konstrukcji stalowej lub zespolonej, z żelbetową płytą pomostową, jej waga stanowi znaczny udział w masie całego przęsła. Z kolei mosty o pokładzie drewnianym mają lekki pomost, jednak zwykle o bardzo małej nośności. W obu przypadkach sposobem podwyższenia klasy obciążenia mostu może być wykonanie pomostu z kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej (ang. fiber reinforced polymers - FRP). W pierwszym z nich zmniejszymy ciężar płyty pomostowej, przez co odciążymy dźwigary główne i/lub inne główne elementy konstrukcyjne obiektu, natomiast w drugim przy podobnej masie pomostu zwiększamy jego nośność. Średni ciężar ustroju nośnego pomostu wykonanego z kompozytów FRP wynosi od 0,6 do 1,5 kN/m², a betonowego od 4,0 do 5,0 kN/m² [2].

¹ l.wlasak@mostostal.waw.pl

² j.jurczuk@mostostal.waw.pl

W pracy [3] dokonano analizy kosztów dla mostów kompozytowych i stalowych. Nakłady potrzebne na budowę przemawiają za tradycyjną konstrukcją, jednak po uwzględnieniu kosztów utrzymania obiektu w całym jego cyklu życia, bardziej ekonomiczne okazują się mosty kompozytowe. Wynika to z ich wysokiej odporności na warunki atmosferyczne. Zależnie od rodzaju włókien oraz osnowy, elementy FRP mogą być odporne zarówno na kwasy jak i zasady [4]. Daje to możliwość budowy obiektów mostowych w agresywnych środowiskach, w których tradycyjne konstrukcje nie zdają egzaminu.

Aby uzyskać elementy kompozytowe o wysokich, powtarzalnych właściwościach należy, przy ich wytwarzaniu, utrzymać ścisły reżim technologiczny. Jest to trudne do uzyskania na placu budowy, dlatego tego typu elementy są zwykle prefabrykowane w zakładach produkcyjnych, przewożone na miejsce docelowe i dopiero tam łączone. Pozwala to na przyspieszenie budowy mostu i ograniczenie do minimum uciążliwości z nią związanych, co jest szczególnie ważne podczas modernizacji istniejących obiektów. Dzięki małej masie oraz dużej sztywności prefabrykatów kompozytowych, ich transport jest tańszy i łatwiejszy niż transport analogicznych elementów wytworzonych z betonu lub stali.

Pierwszy most z kompozytów FRP wybudowano w 1982 roku w Miyun (Chiny) [5]. Pionierską realizacją na terenie Polski jest kładka na terenie Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi oddana do użytku w 1999 roku [6]. Drugim i jak na razie jedynym tak dużym kompozytowym obiektem jest kładka dla pieszych nad drogą S11 w Gądkach koło Poznania oddana do użytku w 2008 roku [7]. Jednak do dziś w Polsce nie powstał jednak żaden kompozytowy most drogowy. W USA pierwszy z nich wzniesiono w Kansas w 1996 roku. W ciągu kolejnych ośmiu lat wybudowano tam lub zmodernizowano, przy wykorzystaniu materiałów FRP, ponad sto obiektów tego typu [8]. Świadczy to o pozytywnych doświadczeniach inwestorów, projektantów oraz wykonawców mostów z kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej i zachęca do zajęcia się tą tematyką.

Niniejsza praca ma na celu przedstawienie koncepcji trzech pomostów kompozytowych, stworzonych w dziale badawczo-rozwojowym Mostostalu Warszawa, udzielenie odpowiedzi czy da się je wykonać metodą infuzji oraz opisanie doświadczeń i napotkanych problemów podczas wykonywania ich prototypowych modeli.

2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW DO PRODUKCJI PANELI KOMOPZYTOWYCH

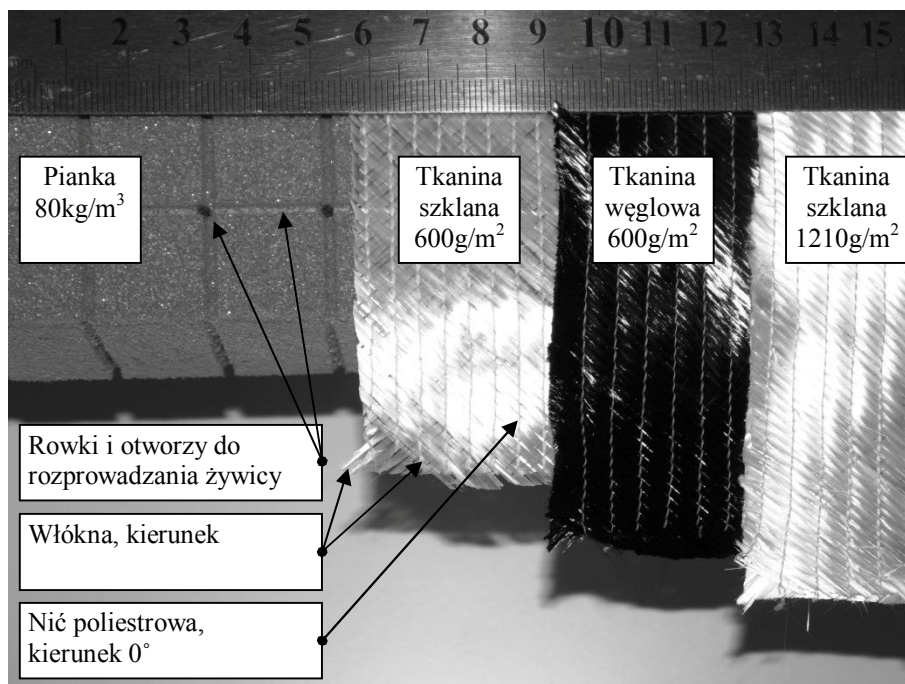
2.1. Tkaniny

Do budowy płyty pomostowej zostały użyte trzy rodzaje sztywnych tkanin dwukierunkowych, o ułożeniu włókien $+45^\circ$ i -45° w stosunku do głównego kierunku tkaniny. Materiały różniły się gramaturą (600 i 1210g/m²) oraz rodzajem włókien: szklane (typu E-glass), węglowe (typu carbon HT) (rys 1). Właściwości włókien podane przez producenta (Saertex) przedstawiono w (tab. 1).

Tablica 1. Właściwości włókien użytych do budowy pomostu

Właściwość	Jednostki	Włókno szklane	Włókno węglowe
		E-glass	Carbon HT
Gęstość	[g/cm ³]	2,6	1,7
Moduł Younga (równoległe do włókien)	[GPa]	73	235
Moduł Younga (prostopadle do włókien)	[GPa]	73	15
Wytrzymałość na rozciąganie	[MPa]	2200	4800
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	[10 ⁻⁶ /K]	5	-0,1
Wydłużenie graniczne	[%]	3,5	1,5

Zródło: http://www.saertex.com/produkt_technik/produkte/fasereigenschaften/



Rys. 1. Materiały zastosowane do budowy pomostu

2.2. Żywica

Osnowa w materiałach FRP jest ośrodkiem przekazującym obciążenia, redystrybuującym naprężenia podczas przerwania części włókien, wypełniającym pustki między włóknami oraz chroniącym włókna od środowiska zewnętrznego [9]. Jako osnowę kompozytów użyto produkt firmy Huntsman (żywica Araldite LY 1564 SP, utwardzacz XP 3486). Jest to dwuskładnikowa termoutwardzalna żywica epoksydowa. Tego typu tworzywo charakteryzuje się trójwymiarową siatką cząsteczkową nadającą mu cechy izotropowe oraz lepszymi właściwościami mechanicznymi niż np. żywice poliestrowe. Aby uzyskać najlepsze parametry wytrzymałościowe należy, po utwardzeniu żywicy, wygrzewać element przez 8 godzin w temperaturze 80°C.

2.3. Pianka

W dwóch koncepcjach płyt pomostowych zastosowano rdzenie z pianki konstrukcyjnej z tworzyw sztucznych. Miały one na celu wypełnić pustki (projektowane pomosty nie są konstrukcjami monolitycznymi), usztywnić ścianki kompozytowe i przenosić częściowo obciążenia pionowe. Dodatkowo, dzięki wyciętym rowkom oraz pionowym otworom, żywica była szybciej i równomierniej rozprowadzana w trakcie wykonywania pomostu.

Użyto pianek z serii Divinycell H, wyprodukowanych przez firmę DIAB, o gęstości 48 i 80 kg/m³. Ich parametry przedstawiono w (tab. 2).

Tablica 2. Właściwości pianek użytych do budowy pomostu

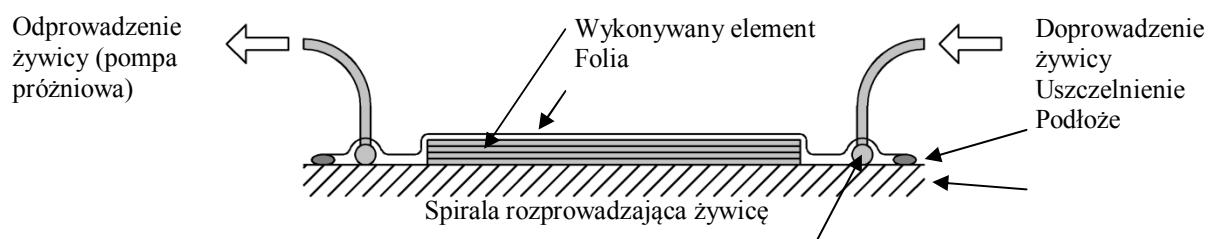
Właściwość	Jednostki	Pianka H45	Pianka H80
Gęstość	[kg/m ³]	48	80
Wytrzymałość na ściskanie	[MPa]	0,6	1,4
Moduł Younga przy ściskaniu	[MPa]	50	90
Wytrzymałość na rozciąganie	[MPa]	1,4	2,5
Moduł Younga przy rozciąganiu	[MPa]	50	90

Źródło: http://www.diabgroup.com/europe/literature/e_pdf_files/ds_pdf/H_DS_EU.pdf

3. WYTWARZANIE PANELI KOMPOZYTOWYCH METODĄ INFUZJI

Panele kompozytowe będące elementami składowymi płyty pomostowej, zostały wytworzone metodą infuzji. W tym procesie, wykonywany element wraz ze spiralami doprowadzającymi i odprowadzającymi żywicę jest przykrywany folią, która jest uszczelniana po obwodzie. Następnie, powietrze spod folii jest odpompowywane za pomocą pompy próżniowej. Po odkręceniu zaworu doprowadzającego żywicę, zaczyna się przesycanie elementu.

Infuzja pozwala uzyskać element o wyższej zawartości objętościowej włókien w kompozycie niż w metoda ręcznego nakładania żywicy. Stosunek ilości włókien do osnowy przekłada się na wytrzymałość kompozytu. Jest on jeszcze wyższy dla elementów wytworzonych metodą pultruzji (przeciągania), jednak ta ostatnia wymaga dużo wyższych, początkowych, nakładów finansowych. Za infuzją przemawia również możliwość swobodnego kształtowanie wymiarów elementu (w pultruzji taka zmiana pociąga za sobą konieczność wykonania nowej formy). W przypadku wykonywania, pionierskich w skali kraju, drogowych pomostów kompozytowych, możliwość prostego modyfikowania wytwarzanych paneli przy jednoczesnym zachowaniu wysokich parametrów wytrzymałościowych jest cechą kluczową, dlatego do produkcji paneli wybrano metodę infuzji (rys. 2). Drogą infuzji wykonywano cały panel, lub jego elementy składowe, które były następnie ze sobą klejone.

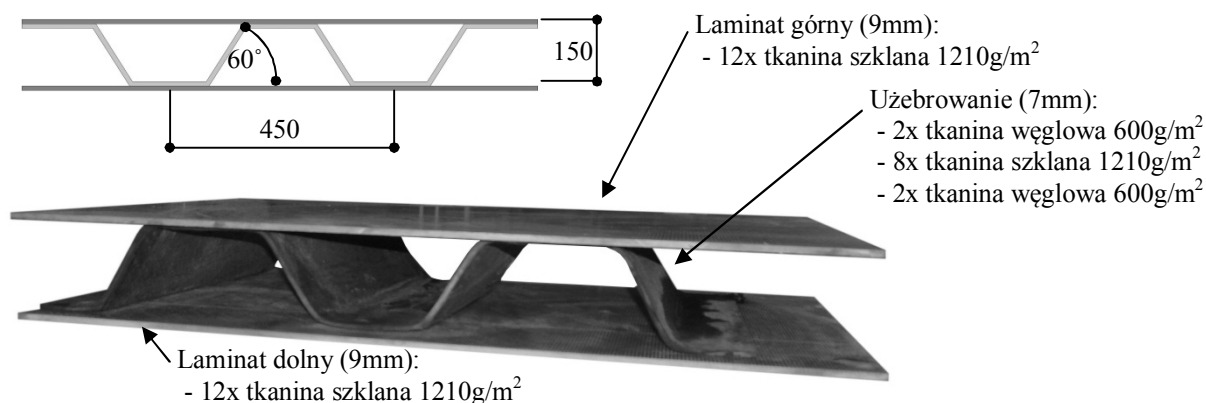


Rys. 2. Schemat procesu infuzji

4. KONCEPCJE POMOSTÓW KOMPOZYTOWYCH

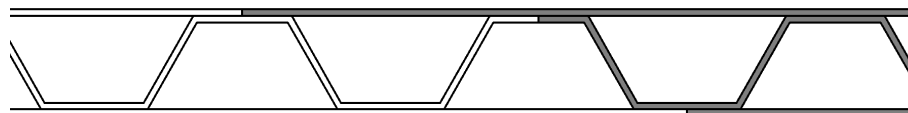
4.1. Koncepcja nr 1

Prefabrykowany panel stanowiący element płyty pomostowej składa się z trzech laminatów: dwóch płaskich (górnego i dolnego) oraz trzeciego, znajdującego się pomiędzy nimi, pełniącego rolę uźebrowania (rys. 3). Elementy składowe zostały wytworzone w trzech niezależnych procesach infuzji i następnie sklejone ze sobą żywicą epoksydową.



Rys. 3. Schemat pomostu oraz zdjęcie wykonanego elementu

Nie przewidziano możliwości montażu płyty pomostowej na poprzecznicach, jedynie na elementach równoległych do osi mostu. Panel musi mieć szerokość mostu oraz uźbrowanie prostopadłe do kierunku podparcia. Aby połączyć ze sobą poszczególne prefabrykaty należy wykonać je z laminatami (górnym i dolnym) przesuniętymi względem siebie (rys. 4.). Elementy należy skleić ze sobą żywicą epoksydową.



Rys. 4. Schemat łączenia prefabrykatów pomostu nr 1

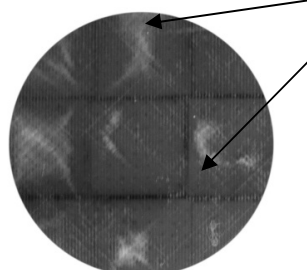
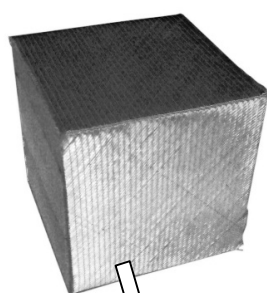
4.2. Koncepcja nr 2

Podobnie jak w poprzedniej koncepcji, na dole i górze panelu znajdują się laminaty składające się z 12 warstw tkaniny szklanej o gramaturze 1210g/m^2 . Część środkowa jest wypełniona piankowymi sześciennymi kostkami (48kg/m^3), o długości boku wynoszącej 15cm, owiniętymi tkaniną szklaną (600g/m^2). Dodatkowo pomiędzy kostkami są poprowadzone wstęgi tkaniny (szklana + węglowa, 600g/m^2) tworząc uźbrowanie płyty. Każda kostka przylega do dwóch żeber głównych, składających się z czterech wstępów materiału, tj. ośmiu tkanin (4 szklanych i 4 węglowych). Owinięcie kostek poprawia przenoszenie na żebra, sił ścinających powstających przy hamowaniu pojazdów. Schemat pomostu przedstawiono na (rys. 5).

**Piankowa kostka
owinięta tkaniną**

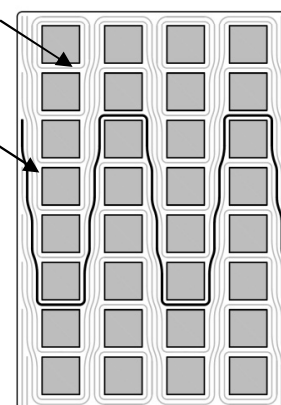
**Zdjęcie dolnej powierzchni
prefabrykatu**

Nieprzezroczysty kompozyt
Przesunięcie kostek względem siebie



**Prowadzenie wstępów
materiału wokół rdzeni
piankowych**

Piankowa kostka
Wstęga



**Kostki, z
poprowadzonymi
wstęgami, ułożone na
tkaninach tworzących**



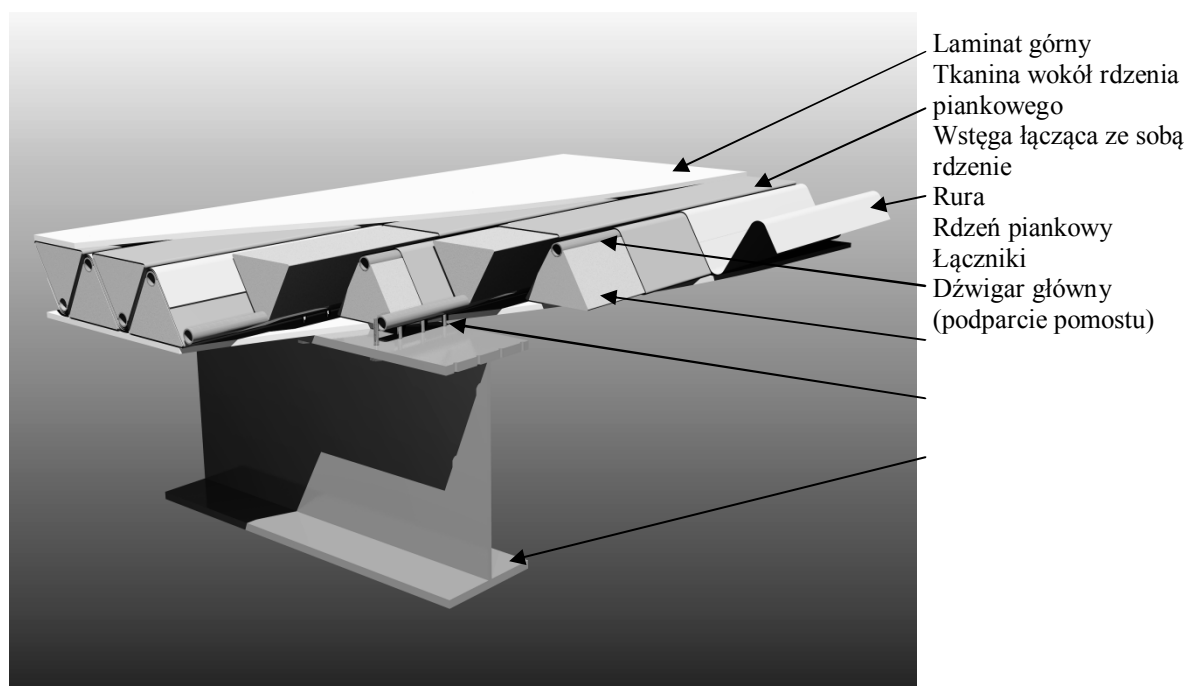
Rys. 5. Schemat budowy pomostu nr 2

Panel wykonano w jednym procesie infuzji. Masa metra kwadratowego wynosi 75kg. Panel musi mieć szerokość mostu oraz uźbrowanie prostopadłe do kierunku podparcia. Łączenie kolejnych prefabrykatów następuje analogicznie jak w pierwszej koncepcji.

Z przyczyn ekonomicznych, w dalszych projektach rozważa się, zastąpienie rdzeni wyprodukowanych przez firmę DIAB, rdzeniami wykonanymi np. z pianki poliuretanowej. Użycie rdzeni o różnej wysokości daje możliwość utworzenia spadków jezdni, np. przekroju daszkowego.

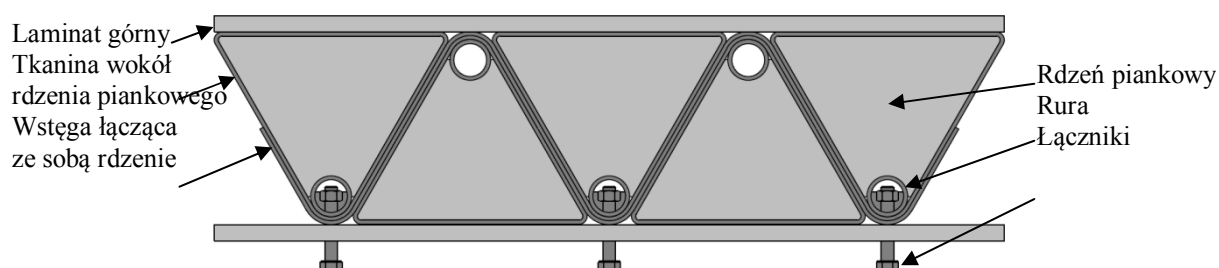
4.3. Koncepcja nr 3

Ostatnią koncepcję pomostu przedstawiono na (rys. 6 i 7). Podobnie jak w dwóch poprzednich dolną i górną część płyty stanowią laminaty z 12 warstw tkaniny szklanej o gramaturze 1210g/m^2 . Elementem podstawowym prefabrykatu jest rdzeń piankowy (w kształcie graniastosłupa prostego o podstawie trapezu równoramiennego z wyciętym półkolem na krótszej podstawie) z przylegającą rurą (stalowa lub kompozytowa). Obie części są owinięte czterokrotnie tkaniną szklaną (600g/m^2). Aby lepiej połączyć ze sobą kolejne rdzenie, pomiędzy nimi jest poprowadzona wstęga (2 tkaniny węglowe o gramaturze 600g/m^2).



Rys. 6. Schemat budowy pomostu nr 3 - perspektywa

Przy budowie prototypowego panelu, aby go uprościć pod względem wykonawczym, zrezygnowano z rur. Prefabrykat został utworzony w jednym procesie infuzji z rdzeniem o grubości 15cm. Masa metra kwadratowego pomostu wyniosła 73kg (w tym 19kg żywicy). Docelowo rury mają służyć do mocowania pomostu do dźwigarów za pomocą śrub (w rurach będą znajdować się nakrętki), umożliwić montaż barier ochronnych i balustrad oraz ułatwić transport i układanie rdzeni w formie.



Rys. 7. Schemat budowy pomostu nr 3 - przekrój

Prefabrykat należy wykonać, na szerokość mostu, z rurami prostopadłymi do kierunku podparcia. Łączenie kolejnych prefabrykatów analogicznie jak w poprzednich koncepcjach.

5. WNIOSKI Z DOŚWIADCZEŃ W WYTWARZANIU PANELI

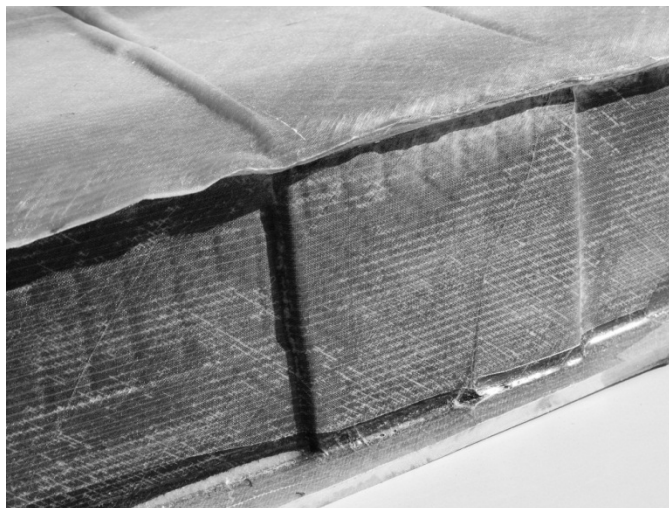
Wszystkie przedstawione koncepcje pomostów drogowych z kompozytów FRP można wykonać w procesie infuzji.

Przy wykonywaniu pierwszego pomostu największą trudnością było uzyskanie równych i równoległych powierzchni laminatu tworzącego uźebrowanie. Należy rozważyć użycie formy i kopyta. Aby ułatwić układanie tkanin oraz poprawić pracę laminatu należy zaokrąglić naroża formy.

Przy wykonywaniu elementów o dużej objętości (koncepcja nr 2 i 3) zaobserwowano ich samoistne podgrzewanie, będące skutkiem wiązania żywicy (jest to proces egzotermiczny). Maksymalna odnotowana temperatura, na powierzchni prefabrykatu, wynosi 34°C , przy temperaturze otoczenia $\sim 20^{\circ}\text{C}$. Przypuszcza się, że jest to przyczyna niejednolitego stopnia przezroczystości dolnych laminatów (por rys. 5). W przypadku wykonywania jeszcze grubszych pomostów należy rozważyć chłodzenie elementu.

W dwóch ostatnich koncepcjach, podczas wypompowywania powietrza, rdzenie piankowe zostały ściśnięte z góry i boku przez otaczające je powietrze. W wyniku nacisku elementy te poprzesuwały się wzajemnie. Na (rys. 8) możemy zaobserwować, przesunięcie rdzeni w płaszczyźnie poziomej (por. rys. 5) oraz pofałdowany górny laminat. Ten ostatni błąd wynika z niewystarczającego dociśnięcia do siebie rdzeni.

Rozwiązaniem powyższych problemów może być zastosowanie formy otaczającej wykonywany prefabrykat z wszystkich stron oprócz góry. Takie rozwiązanie powinno również podnieść powtarzalność wykonywanych elementów.



Rys. 8 Pomost nr 2 – błędy wykonawcze

6. PODSUMOWANIE

Pierwszy pomost jest najłatwiejszy do wykonania, można również z łatwością zweryfikować jakość tworzących go laminatów. Jednak ich klejone połączenie będzie bardzo narażone na pęknięcie w wyniku koncentracji naprężeń zmęczeniowych. Dla pozostałych modeli dużo trudniej wskazać mechanizm zniszczenia. Gdyż połączenie laminatów z rdzeniem jest wykonywane w jednym procesie, na dużo większej powierzchni. Dlatego do dalszych badań wybrano pomosty z rdzeniem piankowym.

Na początku kolejnego etapu prac zostanie przeprowadzona analiza numeryczna obu wybranych koncepcji w celu zoptymalizowania ich wymiarów oraz użytych materiałów. Uzyskane tą drogą dane pozwolą zbudować pełnowymiarowe prototypy, które zostaną poddane laboratoryjnym badaniom statycznym i dynamicznym (zmęczeniowym). Wykonanie tych prac jest planowane do końca roku 2012. W pierwszej kolejności będzie rozwijana trzecia koncepcja. Zastosowano w niej innowacyjny, niespotykany wcześniej system mocowań zarówno panelu pomostowego do dźwigarów głównych jak i elementów wyposażenia (balustrady, bariery).

Piśmiennictwo

- [1] Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. Warszawa, WKŁ, 2010.
- [2] Karbhari V. M., Wang D., Gao Y.: Processing and performance of bridge deck subcomponents using two schemes of resin infusion. *Composite Structures*, nr 51/2001, s. 257-271.
- [3] Kendall D.: The business case for composites in construction. *Reinforced Plastics*, nr 7/2008, s. 20-27.
- [4] Bijen J.: *Durability of engineering structures: design, repair and maintenance*. Cambridge, Woodhead Publishing, 2003.
- [5] Zobel H., Karwowski W.: Kompozyty polimerowe w mostownictwie - pomosty wielowarstwowe. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 2/2006, s. 42-49.
- [6] Zobel H., Karwowski W., Wróbel M.: Kładka z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknem szklanym. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 2/2003, s. 107-108.
- [7] 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* 1-2/2009, s. 69-73.
- [8] O'Connor J. S.: GRP bridge decks and superstructures in the USA. *Reinforced Plastics*, nr 6/2008, s. 26-31.
- [9] Muc A.: *Mechanika kompozytów włóknistych*. Kraków, Księgarnia Akademicka, 2003.

NEW CONCEPTS OF FRP BRIDGE DECKS

Summary

The paper includes detailed description of three road bridges decks concepts designed and manufactured using FRP (fibre reinforced polymers) materials. The presented development took place at the Research and Development Department of Mostostal Warszawa S.A.. The paper presents problems encountered and the experience gained during the manufacturing stage of their models prototyping stage. To build the prototypes a polymeric material (epoxy resin) reinforced with fibres (glass and carbon fabrics) and foam core material were used. The prefabricated prototypes are made in one process called resin infusion and/or in two processes of resin infusion and bonding, using structural epoxy adhesives.

The main conclusion of the research done is the confirmation of the possibility of using the new method for production of road bridge deck sandwich panels.