

Maciej KULPA¹
Tomasz SIWOWSKI²

KSZTAŁTOWANIE PŁYT POMOSTÓW MOSTÓW DROGOWYCH Z KOMPOZYTÓW FRP

Konieczność zwiększenia trwałości pomostów drogowych obiektów mostowych nadała w ostatnich latach bardzo duży impuls pracom badawczym, których celem jest stworzenie nowych rodzajów płyt pomostów mostów drogowych: trwałych, lekkich i łatwych w montażu, wykonanych z zaawansowanych technologicznie materiałów. Wśród tych materiałów najszerze zastosowanie w mostach w ostatnich latach mają kompozyty FRP (*fibre reinforced polymers*). W artykule przedstawiono przegląd systemów płyt pomostów wykonywanych z kompozytów FRP. Nacisk położono głównie na kształtowanie geometryczne płyt w zależności od przyjętej technologii wytworzenia kompozytu. Dokonano podziału na trzy główne grupy kompozytowych płyt pomostowych: wykonywanych metodą infuzji, pultruzji oraz płyt hybrydowych, tj. kompozytowo-betonowych. Porównano wady i zalety poszczególnych rodzajów płyt pomostów oraz dokonano wyboru optymalnej kosztowo konstrukcji i technologii do własnych prac badawczych. W ramach badań własnych zaprojektowano i wykonano trzy prototypowe panele pomostów z kompozytów warstwowych (typu *sandwich*) o różnym układzie konstrukcyjnym. Na podstawie wyników badań wytrzymałościowych ustalono nośność i sztywność poszczególnych paneli. Porównanie tych parametrów pozwoliło na wybór rozwiązania panelu do dalszych prac badawczych i wdrożeniowych.

Słowa kluczowe: płyta pomostu, laminat warstwowy, infuzja, pultruzja, konstrukcje hybrydowe, most drogowy,

1. Wstęp

Płyty pomostów są najbardziej podatnymi na uszkodzenia elementami drogowych obiektów mostowych. Trwałość typowych płyt żelbetowych jest kilkakrotnie krótsza od trwałości dźwigarów głównych lub innych podstawowych elementów obiektów mostowych. Konieczność zwiększenia trwałości płyt pomostów nadała w ostatnich latach bardzo duży impuls pracom badawczym

¹ Autor do korespondencji: Maciej Kulpa, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, (17) 86 51 596, kulpa@prz.edu.pl

² Tomasz Siwowski, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, (17) 86 51 596, siwowski@prz.edu.pl

i rozwojowym, których celem jest stworzenie nowych rodzajów płyt/paneli 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 [22]. Oprócz znaczącego zwiększenia trwałości i zmniejszenia ogólnych kosztów utrzymania, stosowanie lekkich płyt pomostów z nowych materiałów umożliwia niejednokrotnie podniesienie nośności modernizowanego obiektu oraz oszczędności w kosztach wzmacniania podpór i fundamentów.

Od ponad 20 lat obserwuje się w mostownictwie stale rosnące zainteresowanie materiałami kompozytowymi FRP (ang. *fibre reinforced polymers*), stosowanymi zarówno do ochrony, napraw i wzmocnień istniejących konstrukcji jak również do produkcji nowych elementów nośnych, takich jak dźwigary czy płyty pomostów [8]. Powód tego zainteresowania jest oczywisty: trwałość (głównie wysoka odporność na korozję i zmęczenie), duża wytrzymałość, lekkość oraz łatwość kształtowania przekroju poprzecznego elementów z kompozytu. Dzięki tym cechom kompozytów FRP powstało w ciągu ostatnich lat wiele różnych systemów pomostów kompozytowych, stosowanych obecnie przy modernizacji lub budowie obiektów mostowych. Płyty pomostów z kompozytów FRP są wytwarzane z włókien szklanych oraz żywicy epoksydowej lub poliestrowej. Panele pomostów wykonane w pełni z kompozytów FRP dzieli się w zależności od struktury panelu i technologii wykonania, na dwie podstawowe grupy: pomosty warstwowe (typu *sandwich*), produkowane najczęściej metodą infuzji oraz pomosty z kształowników, produkowanych metodą pultruzji (przeciągania) [24]. Trzecią grupę stanowią konstrukcje hybrydowe, które powstają z połączenia kształowników kompozytowych z betonem, zazwyczaj układanym bezpośrednio na placu budowy.

W mostownictwie stosuje się obecnie kilkadziesiąt różnych systemów paneli/płyt pomostów kompozytowych i/lub hybrydowych. Tak duża popularność tych systemów, zwłaszcza w krajach wysoko rozwiniętych (USA, Japonia, Holandia, Szwecja) wynika z ich niepodważalnych zalet konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych. W artykule przedstawiono przegląd wybranych rozwiązań płyt pomostowych we wszystkich trzech grupach, opisano zalety i wady poszczególnych konstrukcji i technologii. Na podstawie wniosków z przeglądu dokonano wyboru konstrukcji i technologii do prac własnych.

Zakład Dróg i Mostów PRz we współpracy z Mostostalem Warszawa S.A. od kilku lat prowadzi własne prace badawcze w celu opracowania i wdrożenia pierwszego polskiego panelu pomostu kompozytowego do budowy i modernizacji mostów drogowych. W ramach badań własnych zaprojektowano i wykonano trzy prototypowe panele pomostów z kompozytów warstwowych. Na podstawie wyników badań wytrzymałościowych ustalono nośność i sztywność paneli. Porównanie tych parametrów pozwoliło na wybór najlepszego rozwiązania panelu do dalszych prac badawczych i wdrożeniowych.

2. Rodzaje płyt pomostów z kompozytów FRP

2.1. Proces wytworzenia płyt/paneli pomostowych

Istnieje wiele technologii wytwarzania elementów kompozytowych. Obecnie najpopularniejszymi metodami stosowanymi do wykonywania paneli pomostów drogowych są pultruzja oraz infuzja, najczęściej w odmianie VARTM (*vacuum assisted resin transfer moulding*). Np. spośród wszystkich instalowanych pomostów w USA, ok. 40% było wykonywane metodą pultruzji. Pozostała część to pomosty wytworzone metodą VARTM lub metodą układania ręcznego [16]. Pozostałe metody wykonywania dużych elementów kompozytowych, takie jak metoda nawijania włókien (ang. *filament winding*) czy też metoda laminowania ręcznego (ang. *hand lay-up*), jakkolwiek często stosowane do wykonywania innych elementów konstrukcyjnych z kompozytów FRP, nie znalazły dotychczas szerszego zastosowania w przemysłowej produkcji paneli pomostów mostów drogowych. Powodem są głównie ograniczenia w zakresie geometrii (metoda nawijania) lub stosunkowo duży rozrzut parametrów wytrzymałościowych oraz jakości wykonania (metoda ręczna). Dlatego w przeglądzie ograniczono się do najliczniej reprezentowanych dwóch technologii wytwarzania: pultruzji i infuzji.

Proces pultruzji (przeciągania) jest to metoda zautomatyzowana, pozwalająca na wykonanie liniowych elementów o stałym przekroju poprzecznym. Elementy są najczęściej zbrojone włóknami ciągłymi (tzw. roving). Włókna są zanurzone w żywicy termoutwardzalnej, a następnie przepuszczone przez system tłoczników, form kształtujących przekrój poprzeczny elementu oraz układ grzewczy, który pozwala na utwardzenie żywicy. Uzyskiwane tą metodą elementy mogą osiągać znaczne długości, ograniczone jedynie wymiarami hal produkcyjnych i względami logistycznymi. Główną wadą tej metody jest ograniczenie przekroju produkowanego elementu. W docelowym panelu pomostu kształtowniki wykonane metodą pultruzji są łączone mechanicznie lub przez klejenie, tworząc sztywną płytę pomostową.

Metoda infuzji w odmianie VARTM jest to proces półautomatyczny, polegający na przesyleniu ułożonych w formie tkanin żywicą, która jest zasysana w miejsce usuniętego próżniowo powietrza z uszczelnionej, nieodkształcalnej formy. Gwarantuje to wykonanie elementu o stabilnych wymiarach geometrycznych, ale wymaga stosowania indywidualnie projektowanej dwuczęściowej formy. W odmianie tej metody, stosowanej m.in. do produkcji paneli pomostów, rolę formy pełni uszczelniona odkształcalna powłoka, zazwyczaj w formie folii, która zastępuje górną część formy. Dzięki temu zabiegowi zmniejsza się koszt początkowy produkcji, ale niewielkiemu pogorszeniu ulegają parametry geometryczne wykonanych elementów. W pojedynczej formie (procesie infuzji) jest wykonywany najczęściej cały panel pomostu, którego gabaryty są podyktowane możliwościami transportu na miejsce wbudowania.

2.2. Konstrukcja płyt pomostów

Konstrukcja paneli pomostów jest ściśle związana z technologią ich produkcji. Wśród rozwiązań stosowanych obecnie w mostownictwie można wymienić trzy podstawowe grupy pomostów mostów drogowych: pomosty wykonywane z kształtowników pultruzyjnych (ang. *pultruded decks*), pomosty warstwowe (ang. *sandwich decks*) oraz pomosty hybrydowe (ang. *hybrid decks*), łączące kompozyt FRP i beton. W pierwszej grupie stosuje się elementy kompozytowe, wykonane wyłącznie metodą pultruzji, w drugiej przeważają konstrukcje wykonane metodą infuzji VARTM, natomiast w trzeciej elementy kompozytowe są także najczęściej produkowane metodą pultruzji.

Pomosty wykonywane z kształtowników pultruzyjnych składają się z pojedynczych elementów liniowych, które są scalane w panele pomostu za pomocą połączeń klejonych i/lub mechanicznych, a następnie montowane do stalowych/betonowych elementów konstrukcji (poprzecznice, podłużnice) za pomocą specjalnych łączników. Przekrój pojedynczych kształtowników składa się zazwyczaj z układów trójkątów lub prostokątów. Kształtowniki pultruzyjne są najczęściej orientowane prostopadle do osi mostu (osi dźwigarów), a panele nie współpracują z dźwigarami w przenoszeniu obciążeń.

Pomosty warstwowe pierwotnie wykonywano metodą laminowania ręcznego, najstarszą i najbardziej rozpowszechnioną metodą produkcji kompozytów FRP. W ostatnich latach pojawiły się jednak konstrukcje wykonane metodą przesycania pod ciśnieniem (infuzji/VARTM). Panele składają się z sztywnych laminatów zewnętrznych (włókna + żywica), klejonych do materiału rdzeniowego. Wypełnieniem rdzeniowym mogą być np. przestrzenne kompozytowe elementy o budowie plastra miodu lub warstwy przekładkowe z lekkich materiałów niekonstrukcyjnych, jak pianki PCV, PUR lub drewno balsa. Pomosty warstwowe, z uwagi na technologię produkcji, charakteryzują się swobodną możliwością wariantowania wysokości rdzenia przekroju lub układu warstw laminatów zewnętrznych.

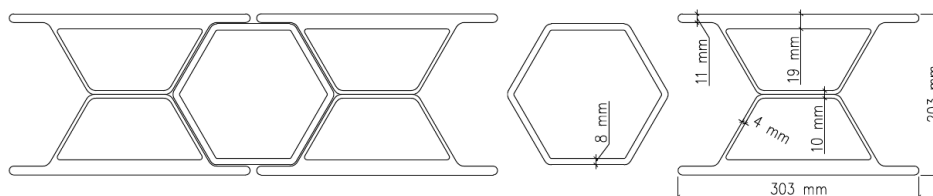
Pomosty hybrydowe łączą w jednym panelu zalety dwóch materiałów: kompozytu FRP oraz betonu. Płyta betonowa jest zbrojona kształtownikami pultruzyjnymi, które także często pełnią rolę deskowania traconego (ang. *stay-in-place formwork*). W większości pomostów hybrydowych stosuje się dodatkowo pręty kompozytowe do zbrojenia betonu. Wykorzystanie betonu ma na celu zwiększenie sztywności pomostu, przeniesienie sił ściskających oraz rozłożenie obciążenia skupionego od kół pojazdów na większą powierzchnię. Elementy kompozytowe są stosowane głównie w strefach rozciąganych pomostu oraz niekiedy jako elementy zbrojące beton przed nadmiernym zarysowaniem skurczowym. Wykorzystanie taniego betonu znacząco obniża końcowy koszt płyty pomostu.

3. Przykłady systemów pomostów kompozytowych

3.1. Pomosty z kształtowników pultruzyjnych

Systemy pomostów kompozytowych z kształtowników pultruzyjnych są najbardziej rozpowszechnioną formą wykorzystania kompozytów FRP w mostownictwie. W samych Stanach Zjednoczonych wdrożono i skomercjalizowano kilkanaście różnych rozwiązań, będących najczęściej wynikiem prac R&D prowadzonych przez producentów wyrobów kompozytowych wraz z uniwersytetami stanowymi.

Pierwszym prezentowanym przykładem jest system *Superdeck* firmy *Creative Pultrusions*, który powstał przy współudziale West Virginia Univeristy, Morgantown, USA. Pierwsza aplikacja systemu miała miejsce w 1997 r. [13]. System składa się z kształtowników pultruzyjnych o dwóch różnych przekrojach: ośmiościanu i podwójnego trapezu (rys. 1). Kształtowniki łączone są przez klejenie. Powierzchnia kształtowników w miejscu połączeń jest śrutowana, aż do odsłonięcia włókien szklanych. Elementy są łączone za pomocą kleju poliuretanowego. Zewnętrzne lamianty szklane są zbudowane z wielokierunkowych tkanin sztych, włókien ciętych i ciągłych włókien nawijanych. Matrycę stanowi żywica winyloestrowa. Panele pomostowe układane są prostopadle do osi mostu. Maksymalna szerokość panelu wynosi 2,44 m, co zostało podyktowane ograniczeniami transportowymi. Długość panelu jest indywidualnie dostosowana do szerokości pomostu a płyta nie ma połączeń w kierunku poprzecznym mostu. Masa jednostkowa płyty pomostu *Superdeck* wynosi 106 kg/m^2 .

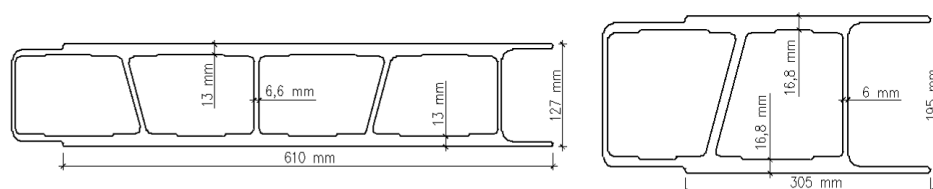


Rys. 1. Kształtowniki i przekrój poprzeczny systemu *Superdeck*

Fig. 1. Shapes and cross-section of the *Superdeck* panel

Kolejnym systemem amerykańskim produkowanym przez firmę *Martin Marietta Composites* jest pomost kompozytowy *DuraSpan*, którego pierwsza instalacja miała miejsce w 1996 r w San Diego pod naukowym nadzorem North Carolina State University, Raleigh, USA. Od tego czasu system wbudowano w kilkudziesięciu mostach na całym świecie [14]. Panel pomostu składa się ze sklejonych ze sobą za pomocą kleju poliuretanowego kształtowników pultruzyjnych o przekroju prostokątnym. Najbardziej rozpowszechnione są dwa wa-

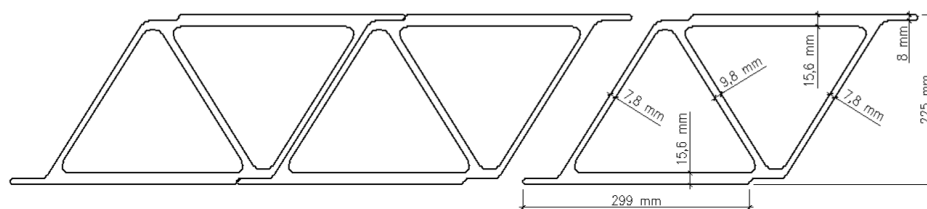
rianty pomostu: *DuraSpan 500* i *DuraSpan 766*. Panel *DuraSpan 500* o masie jednostkowej 63 kg/m^2 , jest wykonywany z kształtowników o wysokości 127 mm i może mieć rozpiętości do 1,5 m. Panel *DuraSpan 766* o masie jednostkowej 93 kg/m^2 i wysokości 195 mm może być stosowany w układach o rozpiętości do 3 m. Kształtowniki są wykonane z tkanin szklanych, zatopionych w żywicy poliestrowej. Ściany pionowe kształtowników składają się z włókien o kierunkach 0° i $\pm 45^\circ$ (w proporcjach 34% i 66%). Laminaty poziome zawierają włókna w kierunkach 0° , 90° i $\pm 45^\circ$ i w proporcjach 60%, 20% i 20% [10]. Przekroje poprzeczne obu kształtowników systemu *DuraSpan* przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przekroje poprzeczne kształtowników systemu *DuraSpan*

Fig. 2. Shape cross-sections of *DuraSpan* panels

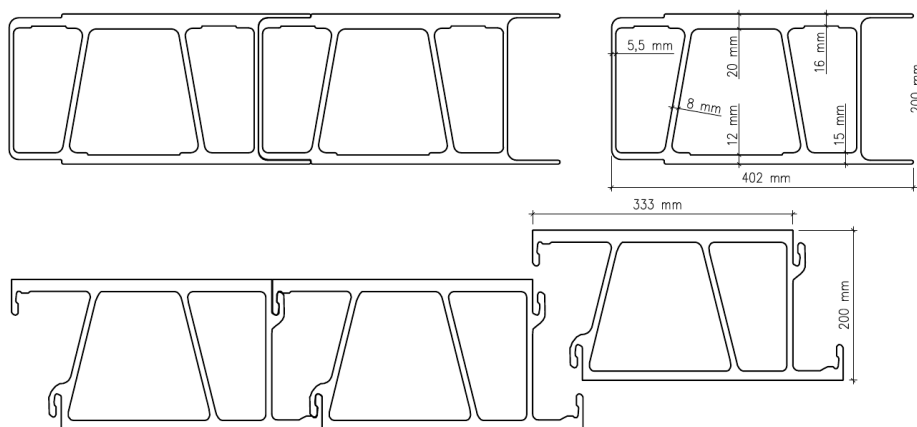
Pierwszym europejskim systemem pomostów kompozytowych, który powstał w wyniku programu badawczego jest system *ASSET*, produkowany przez duńską firmę *Fiberline* [9]. System po raz pierwszy zastosowano w 2002 roku przy przebudowie mostu West Mill w Anglii. Panel pomostu *ASSET* składa się z łączonych ze sobą za pomocą kleju pultruzyjnych kształtowników o przekroju trójkątnym (rys. 3). Kształtowniki są wykonane z włókien szklanych oraz izofталowej żywicy poliestrowej, a ich budowa została zaprojektowana na podstawie kryterium dopuszczalnego ugięcia panelu ($L/300$) oraz różnych kryteriów wytrzymałościowych [4]. Zawartość objętościowa włókien w kształtownikach wynosi ok. 62%. Kształtowniki mają równomierny rozkład włókien i mają zbliżone moduły sztywności laminatów zewnętrznych w obu kierunkach [9]. Typowa rozpiętość panelu *ASSET* wynosi 2 m.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny kształtowników systemu *ASSET*

Fig. 3. Cross-section of the *ASSET* shapes

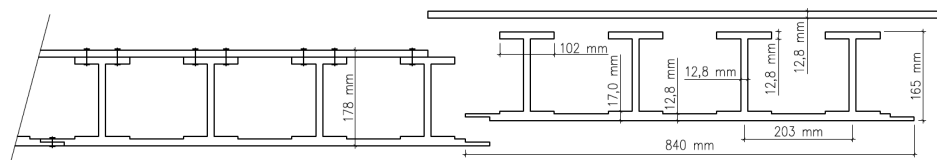
W Korei Południowej pierwszy pomost kompozytowy został wdrożony w roku 2000 przez firmę *Kookmin Composite Infrastructure Inc.*, we współpracy z *Kookmin University* [11]. Konstrukcja pomostu pod nazwą *Delta Deck* składa się z kształtowników pultruzyjnych o przekroju trapezowym. Kształtowniki o symbolu TG200 były klejone wzajemnie tworząc panel pomostu o szerokości w zakresie 2,5 - 4,0 m. Kształtowniki są zbudowane z jednokierunkowych włókien szklanych oraz wielokierunkowych tkanin zszywanych, zatopionych w matrycy z żywicy poliestrowej. W pierwszej wersji systemu kształtowniki były łączone za pomocą klejonych połączeń na pióro i wpust. W celu ułatwienia montażu na placu budowy opracowano nowe połączenie wciskane, modyfikując przekrój kształtowników. Nowe kształtowniki o symbolu SF200 mogły być klejone (obiekty stałe) lub mieć jedynie połączenia mechaniczne (konstrukcje tymczasowe) [19]. Przekroje poprzeczne obu kształtowników TG200 i SF200 przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przekroje poprzeczne systemu *Delta Deck*: wariant TG200 u góry, wariant SF200 u dołu

Fig. 4. Cross-section of *Delta Deck* panel: variant TG200 (top), variant SF200 (bottom)

Kolejnym pomostem z kształtowników pultruzyjnych jest system *Zell-Comp* amerykańskiej firmy o takiej samej nazwie, opracowany m.in. we współpracy z *Purdue University, West Lafayette, USA* [5]. Pomost jest wykonywany z dwóch rodzajów elementów pultruzyjnych: kształtowników dolnych o przekroju z czterema dwuteowymi żebrami podłużnymi oraz płaskich laminatów górnych (rys. 5). Kompozyt jest zbudowany z włókien szklanych w matrycy z żywicy poliestrowej. Elementy pomostu są łączone wzajemnie za pomocą łączników mechanicznych [6]. Laminat górny ma o grubości 13 mm ma wymiary 2,4×1,2 m. Wysokość kształtowników w systemie może wynosić 13, 18 lub 23 cm.

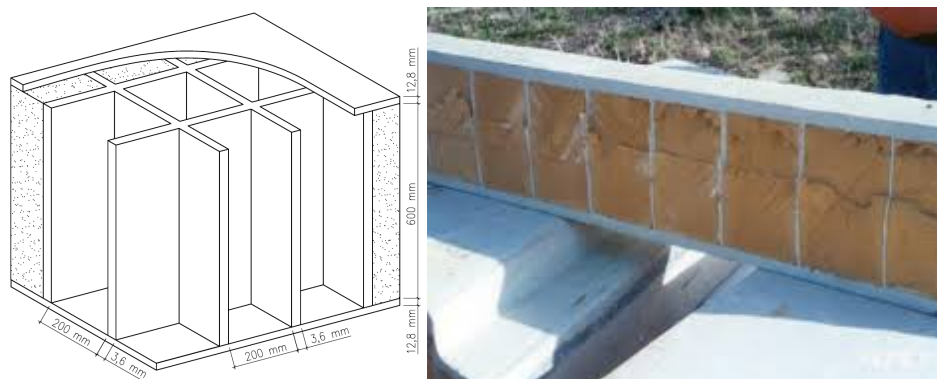


Rys. 5. Przekrój poprzeczny systemu pomostowego firmy *ZellComp* (wariant 18 cm)

Fig. 5. Cross-section of the *ZellComp* deck system (variant 18 cm)

3.2. Pomosty warstwowe

Jednym z pierwszych pomostów warstwowych stosowanych w mostownictwie był system *Hardcore* amerykańskiej firmy *Hardcore Composites*. Panel warstwowy składa się z dwóch szklanych laminatów zewnętrznych oraz rdzenia z pianki poliuretanowo-izocyjanurowej. Laminaty tworzą wewnętrzny ruszt przestrzenny, a rdzeń jest zbudowany z prostopadłościennych bloków z pianki, owiniętych tkaninami z włókna szklanego (rys. 6). Do budowy laminatów użyto włókna szklanego oraz żywicy winylestrowej. Panel pomostu powstaje w procesie infuzji ciśnieniowej VARTM. Zastosowanie wypełnienia w postaci bloków z pianki umożliwia swobodne kształtowanie wymiarów bloków pod różnorodne zastosowania np. jako główną płytę nośną w moście płytowym [2], czy też jako płytę pomostu, opartą na poprzecznicach w rozstawie 4,3 m [1].

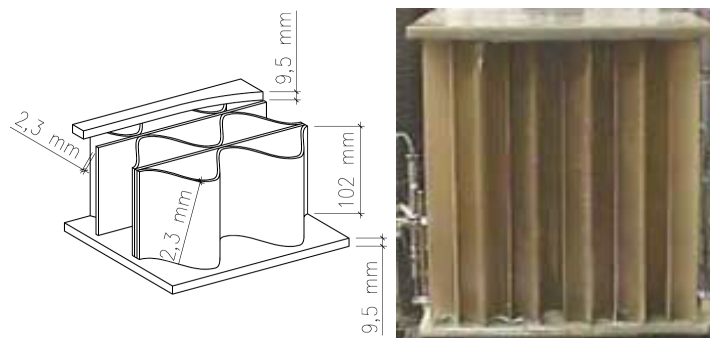


Rys. 6. Schemat budowy panelu systemu *Hardcore* oraz przekrój poprzeczny (po prawej)

Fig. 6. Schema of the *Hardcore* panel and a panel cross-section (right)

Panele pomostu *KSCI* produkowane przez amerykańską firmę *Kansas Structural Composites* składają się ze sztywnych laminatów zewnętrznych, klejonych do kompozytowego rdzenia typu plaster miodu (*honeycomb*). Rdzeń jest zbudowany z płaskich i sinusoidalnych laminatów kompozytowych. Panel może być modyfikowany pod konkretną aplikację w zakresie grubości laminatów

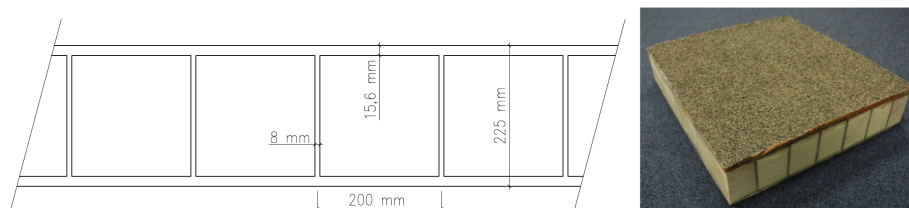
i/lub wysokości rdzenia (grubości panelu). Laminaty są zbudowane z włókien szklanych w matrycy z izoftalowej żywicy poliestrowej [15]. Zawartość objętościowa włókien wynosi ok. 40%. System nadaje do budowy krótkich obiektów płytowych oraz jako płyta pomostu oparta na dźwigarach. Przykładowe wymiary panelu, podane na rys. 7, pochodzą z jednej z pierwszych aplikacji systemu w postaci pomostu opartego na dźwigarach w rozstawie osiowym 1,19 m [15].



Rys. 7. Schemat budowy panelu systemu KSCI oraz przekrój przez panel (po prawej)

Fig. 7. Schema of the KSCI panel and the panel cross-section (right)

Pierwszym przykładem europejskiego pomostu warstwowego jest system *EcoSafe* holenderskiej firmy *Lightweight Structures BV* [7] (rys. 8). Panel pomostu jest zbudowany z dwóch zewnętrznych laminatów kompozytowych, klejonych do rdzenia z drewna balsa. Alternatywnie rdzeń może być wykonany również z pianki PUR. Pomiędzy fragmentami rdzenia wstawiono pionowe żebra, wykonane z takiego samego kompozytu jak laminaty zewnętrzne. Producent oferuje 4 warianty systemu o zmiennej wysokości konstrukcyjnej: od 100 do 400 mm, dobieranej adekwatnie do projektowanego obciążenia pomostu.



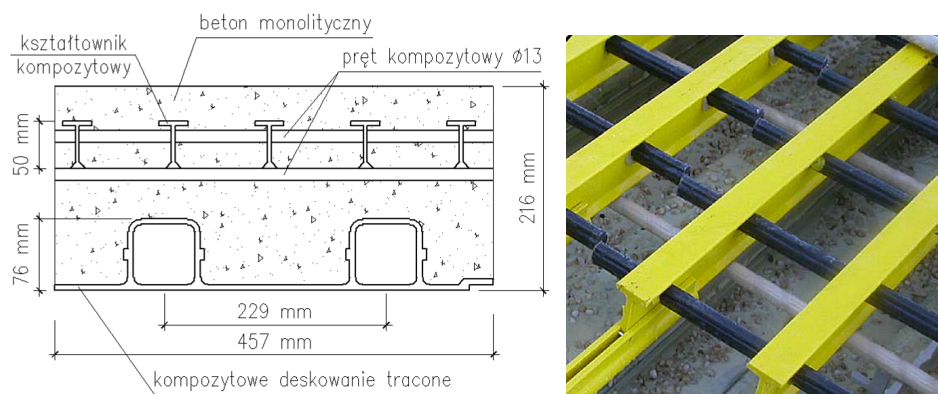
Rys. 8. Przekrój poprzeczny i widok panelu *Ecosafe* (po prawej)

Fig. 8. Cross-section and view of the *Ecosafe* deck panel (right)

Pomost jest wykonywany metodą infuzji VARTM z wykorzystaniem żywicy poliestrowej. Laminaty zewnętrzne panelu mają jednakowe zbrojenie w kierunku poprzecznym i podłużnym z włókien szklanych. Panel o wysokości 300 mm może przenosić obciążenia od pojazdu o masie do 30 ton przy rozstawie podparć ok. 0,75 m.

3.3. Pomosty hybrydowe

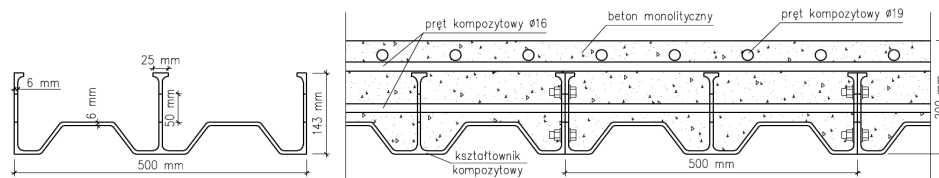
Pierwszym przykładem tego typu pomostu była prototypowa płyta pomostu wiaduktu, zbudowanego w 2005 roku w USA pod nadzorem naukowym University of Wisconsin, Madison [3]. Betonowa płyta pomostu była zbrojona trzema rodzajami elementów kompozytowych: kształtownikami pełniącymi rolę deskowania traconego, podłużnymi prętami kompozytowymi oraz poprzecznymi kształtownikami teowymi. Wszystkie elementy kompozytowe były wytworzone metoda pultruzji. Najistotniejszy składnik tego systemu - kompozytowe deskowanie tracone – było zastosowane w postaci paneli o wymiarach 457×2350 mm. Każdy panel deskowania był usztywniony dwoma podłużnymi żebrami o przekroju zamkniętym. Przed ułożeniem betonu około 30% górnej powierzchni żeber jest pokrywane klejem epoksydowym z kruszywem wapiennym o frakcji do 6 mm. Podłużne pręty kompozytowe miały trzy średnice: 13, 19 i 25 mm. Poprzecznie ułożone kształtowniki teowe o wysokości 50 mm zbroiły płytę pomostu na zginanie lokalne. Schemat oraz przekrój poprzeczny systemu został przedstawiony na rys. 9.



Rys. 9. Przekrój poprzeczny pomostu hybrydowego oraz schemat zbrojenia w postaci kształtowników i prętów kompozytowych (po prawej)

Fig. 9. Cross-section of hybrid deck and composite reinforcing grid (right)

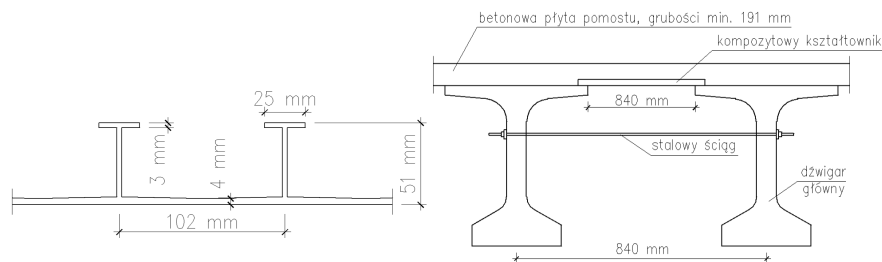
Podobne rozwiązanie pomostu było przedmiotem badań w 2012 roku w Chinach [12]. Pomost hybrydowy był wykonywany na deskowaniu traconym w postaci kompozytowej płyty o przekroju trapezowym, składającej się z kształtowników o szerokości 500 mm (rys. 10). Kształtowniki są łączone na śruby. Kompozytowe żebra podłużne z otworami zwiększały nośność kształtownika oraz umożliwiały, po przepuszczeniu kompozytowych prętów zbrojeniowych, na pełne zespolenie kształtowników z betonem. Stosowano dwa rodzaje prętów zbrojeniowych: $\phi 16$ oraz $\phi 19$. Wszystkie elementy kompozytowe pomostu są wykonane z włókien szklanych i żywicy poliestrowej.



Rys. 10. Przekrój poprzeczny kształtownika kompozytowego (po lewej) oraz gotowej płyty pomostu

Fig. 10. The cross-section of FRP shape (left) and a hybrid deck (right)

Przykładem upowszechnienia systemu hybrydowych płyt pomostowych, składających się z elementów kompozytowych jako deskowania traconego, są typowe betonowe obiekty z belek prefabrykowanych, w których betonowa płyta pomostu o grubości min. 190 mm jest wykonywana na typowych kształtownikach kompozytowych, służących jako płyty pomostowe pod niewielkie obciążenie (np. kładki dla pieszych). Rozciąganie wywołwane zginaniem płyty pomostu jest przenoszone przez stalowy ściąg, łączący sąsiednie belki (rys. 11). Dla uzyskania zespolenia pomiędzy betonem a kompozytem powierzchnia paneli była pokrywana mieszanką żywicy epoksydowej z piaskiem [18].



Rys. 11. Przekrój poprzeczny kształtownika kompozytowego oraz konstrukcji przęsła

Fig. 11. Cross-section of pultruded deck shape of a superstructure

4. Porównanie kompozytowych płyt pomostowych

Pomosty z kształtowników mają największą liczbę połączeń przy jednocześnie największej stabilności wymiarowej poszczególnych elementów. Wysoki (60-70%) jest udział włókien szklanych w laminacie. Proces produkcji kształtowników jest w pełni zautomatyzowany, jednakże istnieją duże ograniczenia w stosunku do kształtu i wielkości przekroju elementów. Dla każdego przekroju poprzecznego wymagany jest indywidualny zestaw form, dodatkowo im przekrój jest większy, tym bardziej skomplikowany jest to proces pultruzji. Wykorzystywanie włókien zorientowanych pod kątem do kierunku osi elementu jest skomplikowane i wymaga dodatkowych nakładów. Nie do końca rozpoznana jest trwałość połączeń klejowych pomiędzy kształtownikami, gwarantująca integralność paneli pomostu.

Pomosty warstwowe mają praktycznie nieograniczoną możliwość kształtowania przekroju poprzecznego i układu konstrukcyjnego. Istnieje możliwość swobodnego dopasowywania wymiarów paneli pod konkretną aplikację. Mają jednak one dużo większe odchyłki wymiarowe w stosunku do pomostów z kształtowników. Także jakość pomostów warstwowych może być zmienna i różnić się nawet w ramach jednego panelu. W przeciwieństwie do pultruzji, niskie są koszty początkowe produkcji pomostów warstwowych. Technologia infuzji VARTM zapewnia swobodę w kształtowaniu budowy laminatów, a zwłaszcza możliwość układania tkanin zbrojących pod dowolnym kątem. Ponadto koszt produkcji panelu warstwowego jest ok. 20% mniejszy niż panelu wykonywanego metodą pultruzji [23].

Pomosty hybrydowe są najczęściej wykonywane z elementów pultruzyjnych, zatem mają w pewnym zakresie zalety i wady tych systemów. Dodatkowo pomosty te charakteryzują się większą możliwością optymalizacji, np. za pomocą wysokości części betonowej i/lub ilości zbrojenia kompozytowego. Pomosty hybrydowe mają optymalny rozkład materiału: beton w części ściskanej, kompozyty FRP w części rozciąganej. Łatwość kształtowania połączeń paneli pomostu z dźwigarami głównymi także wynika z zastosowania betonu. Wadą tych rozwiązań jest brak możliwości redukcji ciężaru własnego przęseł oraz ograniczona trwałość, limitowana do trwałości betonu. Dlatego tego typu systemów nie brano pod uwagę w realizowanym przez PRz programie badawczym.

Porównanie cech technologii wykonania płyt pomostów mostów drogowych z kompozytowych paneli pomostów zamieszczono w tabeli 1 (na podstawie pracy [17]). Biorąc pod uwagę zalety i wady obu technologii zdecydowano o wyborze pomostów kompozytowych wykonywanych metodą infuzji VARTM, jako optymalnego rozwiązania dla polskiego systemu kompozytowych pomostów mostów drogowych. O takim wyborze zdecydowały dwa zasadnicze aspekty: znacząco niższy koszt oraz możliwość swobodnego kształtowania przekroju w zależności od indywidualnego zapotrzebowania.

Tabela 1. Zalety i wady technologii wykonania kompozytowych płyt pomostowych

Table 1. The pros and cons of manufacturing technology for all-FRP composite decks

Cecha technologii	Pultruzja	Infuzja (VARTM)
Możliwość optymalizacji geometrycznej pomostu	-	+
Możliwość optymalizacji materiałowej pomostu	±	+
Stabilność wymiarów elementów	+	-
Liczba połączeń (karbów)	-	+
Możliwość integracji z wyposażeniem pomostu na etapie produkcji	-	+
Ogólna jakość wykonania	+	±
Koszty produkcji	-	+

5. Koncepcja nowego pomostu kompozytowego

5.1. Kształtowanie materiałowe

Po analizach budowy pomostów wykonanych metoda infuzji zdecydowano się na zastosowanie włókien szklanych, ze względu na ich optymalny stosunek wytrzymałości do ceny, żywicy epoksydowej jako matrycy kompozytu oraz pianki rdzeniowej PCV.

Etap projektowania materiałowego 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 laminatów kompozytowych o wartości ok. 15 mm, a grubość laminatów wewnętrznego uzeźbrowania 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 $0^\circ/90^\circ$.

Jako matrycę dla kompozytu paneli pomostu zastosowano żywicę epoksydową Araldite z utwardzaczami XB 3486 i XB 3487. Wg doświadczeń Mostostalu W-wa żywica ta doskonale sprawdziła się w procesie infuzji VARTM [21]. Trzecim materiałem, kształtującym przekrój poprzeczny panelu pomostu, była pianka rdzeniowa PCV o nazwie handlowej Divynycell H80.

Parametry mechaniczne wszystkich materiałów wyznaczono na podstawie badań i zestawiono w tabeli 2.

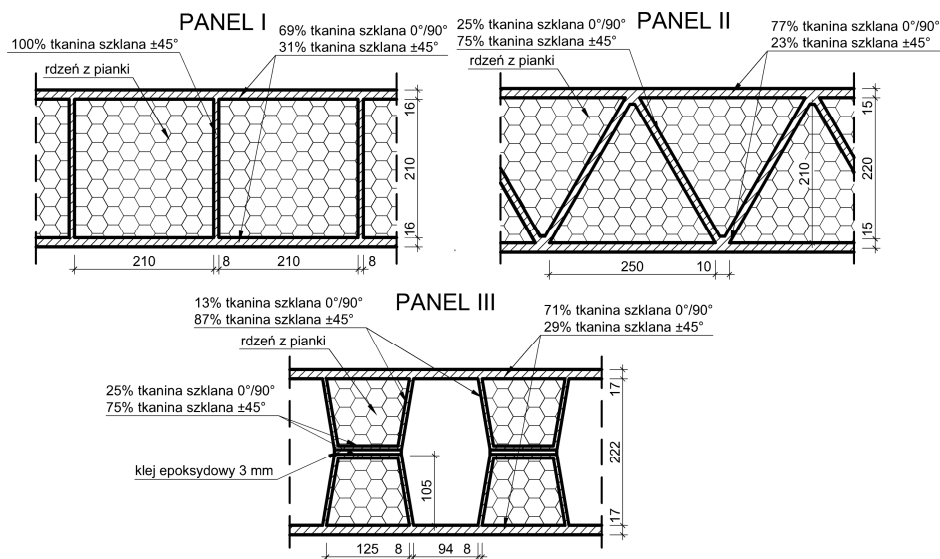
Tabela 2. Parametry materiałowe laminatu szklanego i pianki rdzeniowej

Table 2. The material parameters of GFRP laminate and foam core

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

5.2. Kształtowanie geometryczne

We wstępnym projektowaniu geometrii panelu założono, że będzie on oparty na belkach głównych przęsła o typowym rozstawie ok. 2,5 m. W tym układzie statycznym panel powinien przenieść obciążenie normowe wg [20]. Na podstawie analizy stosowanych rozwiązań a także na podstawie obliczeń wstępnych, przyjęto do badań panele pomostów o trzech różnych przekrojach poprzecznych i budowie pokazanej na rys. 12.



Rys. 12. Ukształtowanie i budowa przekrojów poprzecznych badanych paneli pomostu

Fig. 12. The configuration and cross-sections of the tested deck panels

Wszystkie panele były zbudowane z laminatów szklanych oraz pianki rdzeniowej, przesyconych w procesie infuzji żywicą epoksydową. 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 tylko ok. 50% powierzchni przekroju poprzecznego panelu.

Dla każdego z wybranych rozwiązań wykonano panel pomostu o wymiarach $2,70 \times 1,10$ m. Grubość paneli wahała się od 0,23 do 0,26 m, a różnice spowodowane były względami technologicznymi, związanymi z indywidualną koncepcją układania włókien przy wytwarzaniu poszczególnych paneli.

5.3. 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 z wykorzystaniem worka foliowego. Nie bez znaczenia było również dotychczasowe pozytywne doświadczenie firmy Mostostal Warszawa S.A. w stosowaniu tej technologii przy produkcji elementów kompozytowych w dużej skali [21].



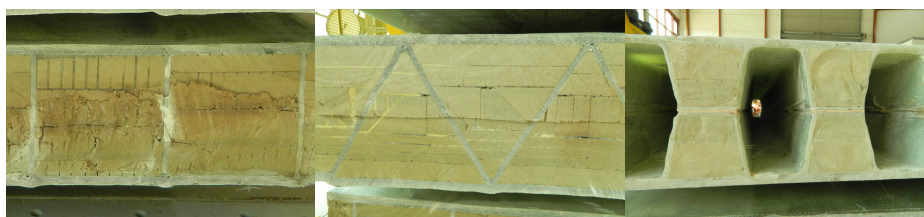
Rys. 13. Zastosowanie technologii infuzji próżniowej do wykonania paneli: po lewej - układanie tkanin zbrojących (panel II), po prawej - część panelu III podczas infuzji żywicą

Fig. 13. The application of vacuum infusion technology for panel's manufacturing: reinforcing fabric placement (left), part of the panel III during the infusion (right)

W czasie infuzji stalowa forma była uszczelniona od góry folią, która przykrywała system rozprowadzający żywicę w całym wykonywanym elemen-

cie (rys. 13). Po całkowitym uszczelnieniu formy następowało odessanie z niej powietrza (wytworzenie próżni), a następnie zasysanie żywicy, która pod ciśnieniem była rozprowadzana pomiędzy tkaninami i warstwami włókien. Po kilkudziesięciu minutach żywica sieciowała, tworząc ostateczny kształt elementu. Na koniec procesu wytwarzania element poddany zostawał ogrzaniu, co podniosło wytrzymałość i zwiększało trwałość kompozytu.

Po wytworzeniu panele I i II wykazywały pewne odchyłki od nominalnej geometrii, zwłaszcza w pobliżu żeber wewnętrznych (rys. 14). 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. 14. Przekroje poprzeczne wytworzonych paneli (od lewej) I, II i III oraz widoczne deformacje w strefach połączeń żeber z arkuszami powierzchniowymi

Fig. 14. Cross-sections of completed panels (from left) I, II I III and visible deformations in areas of connections of inner stiffeners with outer sheets

6. Badania paneli pod obciążeniem statycznym

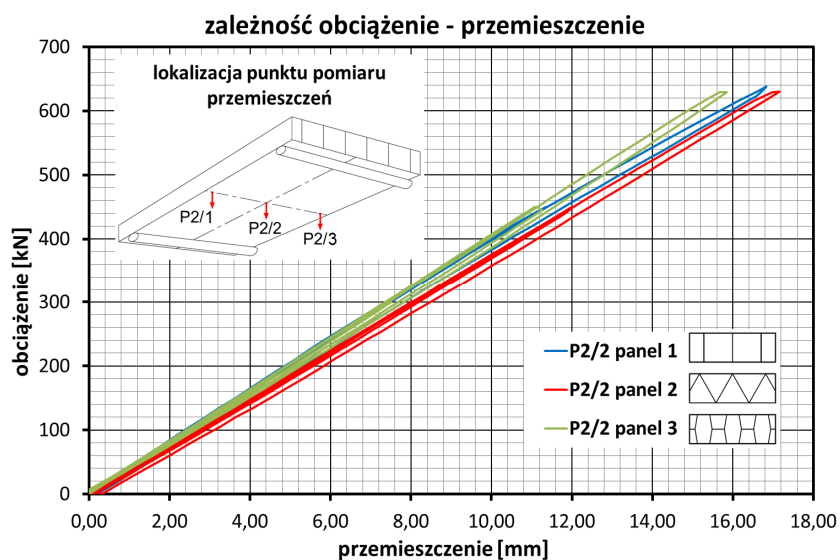
Celem wstępnych badań wytrzymałościowych było określenie sztywności i nośności granicznej poszczególnych rodzajów paneli pomostu. Porównanie tych charakterystyk pozwoliło na wybór rozwiązania konstrukcyjnego panelu do dalszych badań. Badania wytrzymałościowe paneli zostały wykonane w akredytowanym laboratorium Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury 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. 15).



Rys. 15. Panel I podczas badań wytrzymałościowych (po lewej) oraz sposób przyłożenia obciążenia skupionego na górnej powierzchni panelu (po prawej)

Fig. 15. Panel I under testing (left) and force distribution on upper surface of the deck (right)

Podczas badań w wybranych punktach paneli były mierzone przemieszczenia za pomocą czujników indukcyjnych oraz odkształcenia za pomocą tensometrów elektrooporowych. Podczas badań wszystkie panele zostały obciążone maksymalną możliwą do wywołania siłą 630 kN, co stanowiło 420% charakterystycznego obciążenia normowego. Zależność obciążenie-przemieszczenie dla wszystkich trzech paneli pomostu przedstawiono na rys. 16, a szczegółowe wartości pomierzonych przemieszczeń w tabeli 3.



Rys. 16. Porównanie przemieszczeń w środku rozpiętości poszczególnych paneli

Fig. 16. Comparison of all three panels' displacement

Tabela 3. Maksymalne przemieszczenia poszczególnych paneli dla $P_{\max} = 630$ kNTable 3. The maximum displacement of panels for $P_{\max} = 630$ kN

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

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 (Lt/250) przy sile maksymalnej, odpowiadającej 420% charakterystycznego obciążenia normowego.

Pod obciążeniem maksymalnym $P_{\max} = 630$ kN żaden z paneli nie uległ zniszczeniu, wszystkie pracowały sprężysto w całym zakresie obciążenia (rys. 16). 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 w przekroju poprzecznym.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wszystkie trzy panele wykazywały podobną sztywność, jednakże panel III osiągnął najmniejsze przemieszczenie pod maksymalną siłą 630 kN. Biorąc pod uwagę również najmniejsze deformacje na górnej powierzchni panelu, właśnie to rozwiązanie (panel III) zostało wybrane jako optymalna konstrukcja do dalszych prac badawczych i ewentualnego wdrożenia.

7. Podsumowanie

Celem prac badawczych opisanych w artykule jest opracowanie, wykonanie i wdrożenie pierwszego polskiego systemu pomostów kompozytowych do zastosowań w mostach drogowych. Na podstawie szerokiego studium literaturowego wybrano najlepszą technologię wytworzenia oraz trzy najbardziej obiecujące koncepcje kształtu geometrycznego. Wstępne obliczenia paneli pod bezpośrednim obciążeniem drogowym pozwoliły na dobór budowy poszczególnych laminatów. Kolejnym krokiem było wytworzenie prototypowych paneli oraz ich badania wytrzymałościowe w zakresie nośności i sztywności. Podsumowaniem tej fazy badań jest wybór optymalnego rozwiązania na podstawie wyników badań oraz na podstawie czynników ekonomicznych (koszt materiałów, koszt wytworzenia) i technologicznych (czasochłonność, ograniczenie deformacji w procesie produkcji).

Metoda infuzji okazała się bardzo przydatna do wytwarzania elementów kompozytowych o dużych gabarytach. Jej zastosowanie pozwoliło na uzyskanie laminatów o prawidłowym przesyceniu przy całkowitej grubości laminatu przekraczającej 15 mm. Jednocześnie w przypadku paneli wykonywanych jednoetapowo (panel I i II) infuzja powodowała deformacje podłużne na zewnętrznej powierzchni laminatów. Wielkość tych imperfekcji może powodować problemy przy układaniu nawierzchni cienkowarstwowej. Problem ten został całkowicie wyeliminowany w koncepcji III, gdzie panel był wykonywany dwuetapowo. Dzięki rozdzieleniu produkcji na dwa procesy możliwe było uzyskanie większej dokładności oraz lepszej jakości laminatów. Ponadto ze względu na mniejszą liczbę rdzeni piankowych proces wytwarzania panelu III był mniej czasochłonny niż w przypadku paneli I i II, które wymagały ułożenia bardziej skomplikowanych i liczniejszych warstw tkanin i pianek rdzeniowych.

Badania wytrzymałościowe i doświadczenia technologiczne wykazały, że najlepszą z analizowanych koncepcji okazał się panel III. Czynnikiem, który (oprócz największej sztywności) zdecydowały o wyborze panelu III były znacząco mniejsze imperfekcje technologiczne, równość powierzchni laminatów zewnętrznych oraz najniższy jednostkowy koszt produkcji. Ten rodzaj pomostu został wybrany do dalszych badań. 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, dynamicznym jak i zmęczeniowym.

Literatura

- [1] Alampalli, S., Kunin J.: Load testing of an FRP bridge deck on a truss bridge. *Applied Composite Materials*, Vol.10, No.2, 2003, s. 85-102.
- [2] Alampalli, S., O'Connor J., Yannotti A. P.: Design, fabrication, construction, and testing of an FRP superstructure. Special Report No. FHWA/NY/SR-00/134. Transportation Research and Development Bureau, New York State Department of Transportation, USA 2000.
- [3] Berg A., et al.: Construction and cost analysis of an FRP reinforced concrete bridge deck. *Construction and Building Materials*, Vol.20, No.8, 2006, s. 515-526.
- [4] Canning L., et al.: 7.2 The analysis, design and optimisation of an advanced composite bridge deck. *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction: Proceedings of the First International Conference, Held at Southampton University, Thomas Telford, UK 2002.*
- [5] Chou C.C., Chen Y.: Experimental and Analytical Evaluation of Composite Action between Steel Girders and Fiber-Reinforced Polymer Bridge Decks. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal 2012.*

- [6] Gleason A., Dusicka P.: Strength and Fatigue of Three Glass Fiber Reinforced Composite Bridge Decks with Mechanical Deck to Stringer Connections. Final Report No. SR 500-490. 2012.
- [7] Gradeci K.: Upgrading Old Movable Bridges with FRP Deck Application: The case study of Wilhelminabrug (Master Thesis). TU Delft, Delft University of Technology, The Netherlands 2013.
- [8] Keller T.: Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. Structural Engineering Documents, No. 7, IABSE, Zurich, 2003.
- [9] Keller T., Gürtler H.: Quasi-static and fatigue performance of a cellular FRP bridge deck adhesively bonded to steel girders. *Composite Structures*, Vol.70, No.4, 2005, s. 484-496.
- [10] Keller T., Schollmayer M.: Plate bending behavior of a pultruded GFRP bridge deck system. *Composite Structures*, Vol.64, No.3, 2004, s. 285-295.
- [11] Lee S.W., Hong K.J.: Opening the gate: construction of 300 M composite-deck bridge in Korea. *Proceedings of the First Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS 2007*, Hong Kong, China 2007.
- [12] Liu Y., et al.: Static and fatigue experimental study on flexural behavior of hybrid GFRP-concrete bridge decks. *Proceedings of the Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS 2012*, Hokkaido University, Japan 2012.
- [13] Lopez-Anido R., Troutman D., Busel J.: Fabrication and installation of modular FRP composite bridge deck. *Proceedings of the 1998 International Composites Expo*, Nashville, Tennessee, USA 1998.
- [14] Nelson, J.L.: Behavior of GFRP bridge decks for highway bridges (Master's Thesis), North Carolina State University, USA 2005.
- [15] Nystrom, H., Watkins, S., Stone, D., Nanni, A.: Laboratory and Field Testing of FRP Composite Bridge Decks and FRP-Reinforced Concrete Bridge For City of St. James, Phelps County, MO. Combined Final Report for Contracts RI00-021 and RI00-031, USA 2002.
- [16] O'Connor, J.: GRP bridge decks and superstructures in the USA. *Reinforced Plastics*, Vol.52, No.6, 2008, s. 26-31.
- [17] O'Connor J. Hooks J.: USA's experience using fiber reinforced polymer (FRP) composite bridge decks to extend bridge service life. Technical Memorandum of Public Works Research Institute. Japan 2003.
- [18] Oliva M., et al.: FRP Stay-in-Place Formwork and Reinforcing for Concrete Highway Bridge Decks. *Proceedings of the 8th International Symposium on FRP in Reinforced Concrete Structures, FRPRCS-8*, University of Patras, Patras, Greece 2007.
- [19] Park, S.Z., Hong K.J., Lee S.W.: Behavior of an adhesive joint under weak-axis bending in a pultruded GFRP bridge deck. *Composites Part B: Engineering*, Vol.63, No.5, 2014, s. 123-140.
- [20] PN-EN 1991-2:2007. Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów.

- [21] Poneta P., Kulpa M., Własak L., Siwowski T., Koncepcja i badania innowacyjnego dźwigara mostowego z kompozytów FRP. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 3, 2014, s. 147-151.
- [22] 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.
- [23] Zhou A., Lesko J.J., Davalos J.F.: Fiber reinforced polymer decks for bridge systems. COMPOSITES 2001, Convention and Trade Show, Composite Fabrications Association (CFS), Tampa, FL, USA 2001.
- [24] Zobel H., Karwowski W.: Kompozyty polimerowe w mostownictwie – pomosty warstwowe. *Geoinżynieria - drogi, mosty, tunele*. Nr 2, 2006, s. 42- 49.

STRUCTURAL SHAPING OF FRP BRIDGE DECKS

Summary

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 paper reviews the most common bridge deck systems made of FRP composites. The emphasis was mainly on the shaping the geometric depending on the technology manufacturing. The systems were divided into three groups: bridge decks made by pultrusion, infusion and hybrid concrete-FRP composite. In the next step own cross-section of decks were developed, designed and three different prototypes of panels were made in full scale (dimensions in plan $1,1 \times 2,7$ m). The last stages were tests of the three bridges sandwich panels with different structural arrangement. Based on tests, the strength of panels its load capacity and stiffness were established. Comparison of these characteristics and experience gained during making prototypes, allowed to choose the best panel for further research and implementation.

Keywords: bridge deck panel, FRP laminates, infusion, pultrusion, hybrid structures, road bridge

Przesłano do redakcji: 30.05.2015

Przyjęto do druku: 1.12.2015

DOI: 10.7862/rb.2015.154