

Najdłuższy w Polsce obiekt mostowy z kompozytów FRP

prof. dr hab. inż. Tomasz Siwowski, dr inż. Maciej Kulpa, dr inż. Mateusz Rajchel
Politechnika Rzeszowska
mgr inż. Dariusz Oboza
Promost Consulting, Rzeszów

W artykule opisano projekt i konstrukcję kładki rowerowej przy Moście Karpackim w Rzeszowie. Projekt inwestycji wykonała firma Promost Consulting Sp. z o.o. Sp.k., a jej generalnym wykonawcą była firma Intop Tarnobrzeg Sp. z o.o.

Od roku 2016, gdy został zbudowany pierwszy w Polsce obiekt mostowy z kompozytów FRP [1], popularność mostowych konstrukcji kompozytowych w naszym kraju systematycznie wzrasta. Głównym powodem są doskonale własności mechaniczne i wysoka trwałość kompozytów FRP, a także upowszechnienie metod kształtowania i projektowania mostów z kompozytów FRP [2]. Najczęściej konstrukcje kompozytowe są stosowane w budowie nowych kładek pieszo-rowerowych [3, 4], przy modernizacji (wymianie) pomostów istniejących mostów [5] oraz przy poszerzaniu istniejących obiektów [6]. W każdym z tych obszarów nie bez znaczenia są także dodatkowe zalety konstrukcji kompozytowych: mała masa (lekkość) i pełna prefabrykacja oraz związane z nimi łatwość i szybkość montażu. Wśród kilku dostępnych technologii kształtowania i wytwarzania mostowych konstrukcji kompozytowych obecnie zdecydowanie dominują płyty warstwowe (ang. *sandwich*) wytwarzane metodą infuzji próżniowej VARTM (ang. *vacuum assisted resin transfer moulding*).

Opisana w artykule realizacja kładki rowerowej przy Moście Karpackim w Rzeszowie łączy dwa wyżej wspomniane obszary zastosowań: jest nową, indywidualnie zaprojektowaną konstrukcją kompozytową, opartą na podporach sąsiedniego mostu i stanowiącą jednocześnie jego poszerzenie. Taki sposób poszerzania mostów jest jedną z najbardziej efektywnych i najczęściej stosowanych metod zwiększania szerokości użytkowych istniejących mostów [7]. Lekka i trwała konstrukcja kompozytowa jest w takim przypadku optymalnym wyborem techniczno-ekonomicznym.

Założenia do projektowania

Budowa kładek rowerowych przy istniejących mostach od dawna była postulatem rzeszowskich rowerzystów. W Rzeszowie jest dużo ścieżek rowerowych, ale problemem jest brak ich ciągłości, uniemożliwiający płynną i bezkolizyjną komunikację rowerzystów i pieszych. Głównym utrudnieniem są trzy rzeszowskie mosty przez Wisłok, które nie mają ścieżek rowerowych: Most Lwowski, Most Narutowicza i Most Karpacki. Dlatego na wniosek Stowarzyszenia „Rowery.Rzeszow.pl” miasto podjęło decyzję o budowie kładek rowerowych przy wspomnianych mostach, ponieważ na żadnym z tych obiektów nie ma możliwości poprowadzenia ścieżek rowerowych. Przy Moście Lwowskim powstała kładka rowerowa o konwencjonalnej konstrukcji zespolonej, oddalona od istniejącego mostu o ok. 30 m. W przypadku Mostu Narutowicza kładka zostanie wybudowana na istniejącej

konstrukcji wsporczej ciepłociągu, biegnącego bezpośrednio przy moście. Stalowa konstrukcja wsporcza zostanie „przykryta” lekkim pomostem kompozytowym, połączonym z pasami górnymi blachownic konstrukcji. Natomiast Most Karpacki zostanie jednostronnie poszerzony o dwukierunkową drogę dla rowerów za pomocą konstrukcji kompozytowej, opartej na stalowych wspornikach mocowanych do podpór istniejącego mostu. Budowa trzech kładek będzie kosztować miasto ok. 11 mln zł. Termin ich oddania do użytkowania mieszkańcom Rzeszowa przewidziano na wrzesień 2021 r. Inwestycja jest współfinansowana z Programu Operacyjnego Polska Wschodnia 2014-2020: Działanie 2.1. – Zrównoważony transport miejski.

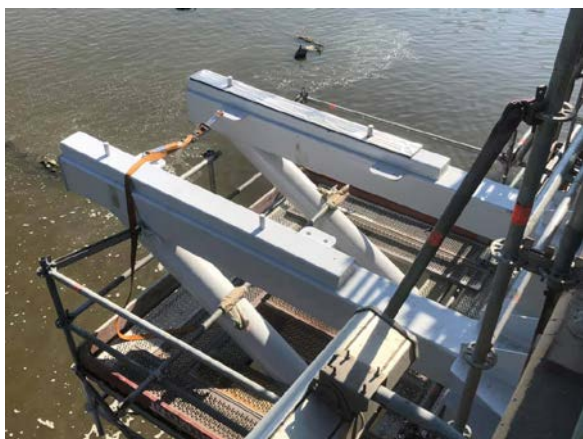
Most Karpacki jest najbardziej obciążonym ruchem mostem Rzeszowa, położonym w ciągu ulicy Powstańców Warszawy, będącej fragmentem drogi krajowej nr 94. Parametry techniczne nowej kładki rowerowej przy Moście Karpackim zostały zdeterminowane sposobem jej podparcia na podporach istniejącego mostu oraz wymaganiami użytkowymi dla tego typu konstrukcji, sformułowanymi przez inwestora. Podstawowe parametry techniczne obiektu są następujące:

- schemat statyczny: pięcioprzęsłowy, swobodnie podparty;
- długość całkowita: 104,94 m;
- rozpiętości teoretyczne: 23,54 + 23,67 + 23,67 + 23,54 + 3,73 m;
- szerokość całkowita: 3,01 m;
- szerokości użytkowe: 2,50 + 2 x 0,21 m (dwukierunkowa droga rowerowa, balustrady z gzymsami);
- klasa obciążenia: PN-EN 1991-2 (rozdział 5, kładki dla pieszych).

Ze względu na fakt, że nowa kładka będzie oparta na podporach istniejącego mostu (z 1973 r.) projektanci zdecydowali o przyjęciu rozwiązania konstrukcyjnego o minimalnym ciężarze własnym. Z dwóch rozważanych alternatyw konstrukcyjnych: aluminiowej i kompozytowej, wybrano tę drugą.

Projekt i konstrukcja kładki

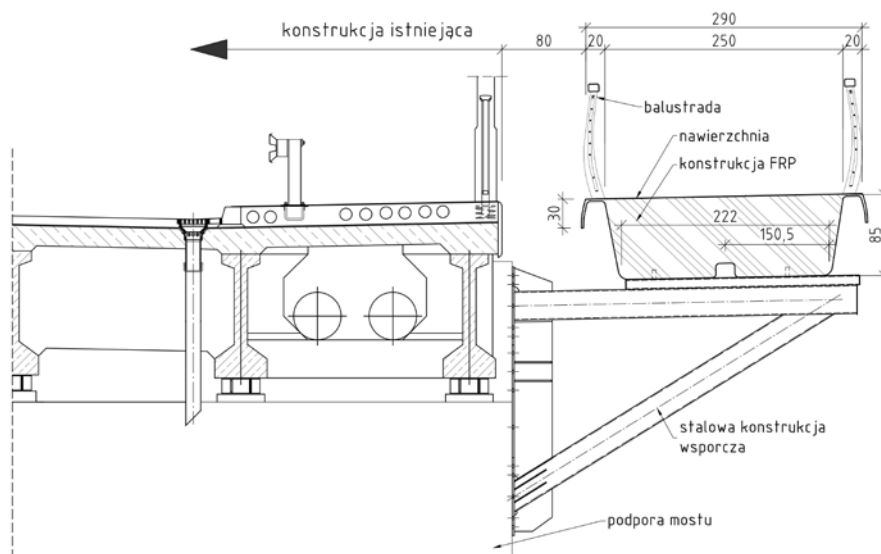
Podstawowy projekt kładki zakładał konstrukcję przęsła zbudowaną z dwóch kompozytowych dźwigarów cienkościennych w kształcie litery U, zespolonych za pomocą połączeń klejowych z kompozytową płytą pomostu o konstrukcji warstwowej. Taka konstrukcja została wdrożona w jednym z pierwszych polskich kompozytowych mostów drogowych [8]. Jednakże z inicjatywy wykonawcy kładki powstał projekt zamienny, bazujący



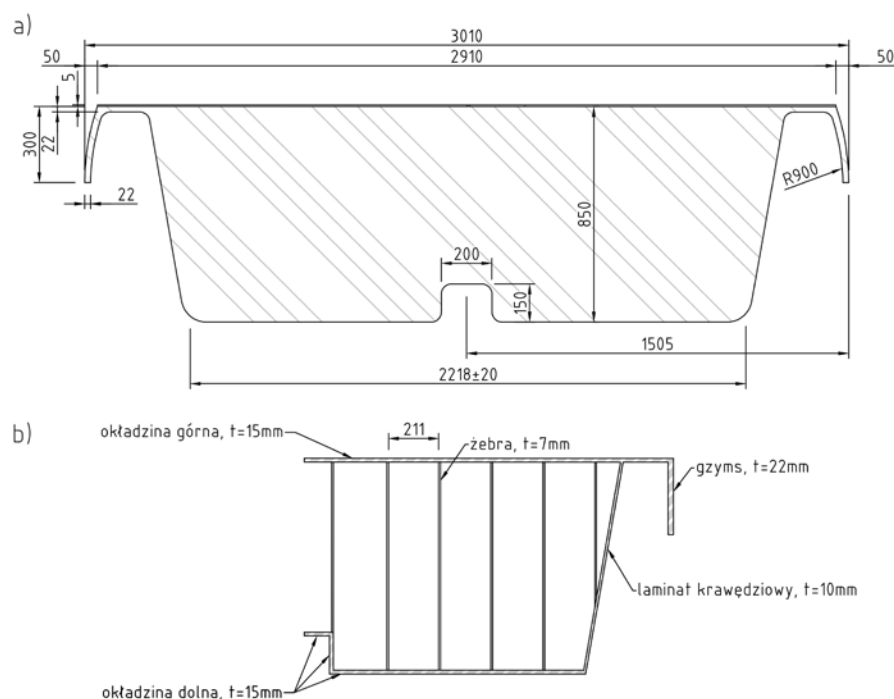
Fot. 1. Wspornik stalowy mocowany do istniejącej podpory

na holenderskiej technologii płyt kompozytowych InfraCore® Inside [9]. W wyniku modyfikacji konstrukcji przęsła dodatkowo zmniejszono ciężar własny konstrukcji kładki, co wymagało przeprojektowania wsporników stalowych (rys. 1).

Warstwowa konstrukcja przęseł kompozytowych została zaproponowana przez wytwórcę, tj. holenderską firmę FiberCore Europe B.V., twórcę i głównego europejskiego producenta płyt kompozytowych w technologii InfraCore® Inside (rys. 2a). Konstrukcja warstwowa przęsła składa się z laminatów okładzinowych górnego i dolnego oraz żeber pionowych, usztywniających rdzeń płyty, wykonany z pianki PUR o gęstości 38 kg/m³ (rys. 2b). Laminaty i żebra są wykonane z tkanin z włókien szklanych typu E oraz żywicy poliestrowej. Rdzeń z pianki pełni jedynie rolę wypełnienia płyty i nie jest uwzględniany w obliczeniach. Autorzy artykułu wykonali niezależne obliczenia sprawdzające zaproponowaną konstrukcję, przyjmując następujące podstawy do projektowania:



Rys. 1. Przekrój poprzeczny kładki i istniejącego mostu



Rys. 2. Konstrukcja przęsła kładki kompozytowej: a) przekrój poprzeczny; b) budowa konstrukcji kompozytowej

- obciążenie tłumem pieszych (5,0 kN/m²) plus obciążenie pojazdem specjalnym (120 kN) wg PN-EN 1991-2;
- oddziaływanie termiczne wg PN-EN 1991-1-5;
- częściowe obciążeniowe współczynniki bezpieczeństwa wg PN-EN 1990;
- częściowe materiałowe współczynniki bezpieczeństwa wg EuCIA [10];
- sprawdzenie normowe SGN wg EuCIA [10];
- dopuszczalne ugięcie L/300 wg DMRB [11];
- podstawowa częstotliwość drgań mniejsza od 5 Hz (w przypadku drgań pionowych) oraz 2,5 Hz (w przypadku drgań poziomych i skrętnych) wg PN-EN 1990 Załącznik A2;
- klasa komfortu TC3 wg JRC53442 [12];
- klasa konsekwencji zniszczenia CC2 wg PN-EN 1990;
- trwałość 100 lat wg PN-EN 1990.

Do projektowania konstrukcji kompozytowej kładki wykorzystano model numeryczny zbudowany w śro-

Paulina Rozenbłat, Prezes Zarządu Rozenbłat Sp. z o.o.

Kładki rowerowe przy moście Karpackim i Narutowicza w Rzeszowie stanowiły kolejne ciekawe wyzwanie. Od wybudowania przez nas pierwszego mostu kompozytowego w Lełkowie w 2005 roku zrealizowaliśmy w Polsce ponad 40 obiektów. Na świecie w technologii InfraCore Inside jest ich ponad 1000.

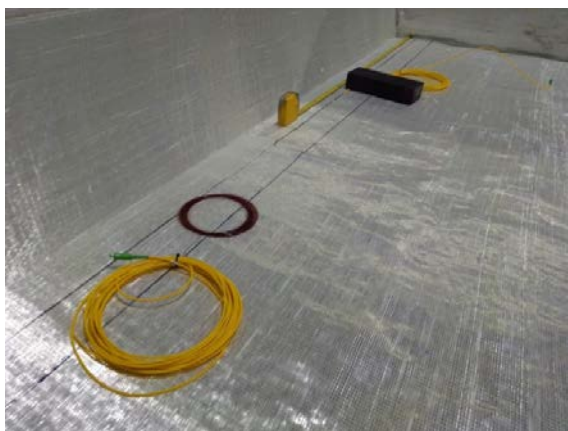


Tym razem projekt pozwolił nam po raz pierwszy zastosować przęsła kompozytowe jako wspornikowe poszerzenie istniejącej konstrukcji mostu (Karpacki) oraz wykorzystanie konstrukcji stalowej ciepłociągu (Narutowicza). Technologia InfraCore Inside, która została wykorzystana do produkcji prefabrykatów, gwarantuje ich trwałość i wytrzymałość. Obiekty w Rzeszowie pokazują dwie różne możliwości zastosowania prefabrykatów, tj. płaską płytę pomostową oraz łukowe przęsła.

Cieszymy się, że materiał kompozytowy, obok stali i betonu, coraz częściej zaczyna być brany pod uwagę przez grono projektantów i wykonawców. Jesteśmy przekonani, że zadowoleni inwestorzy i użytkownicy również bardzo szybko zaakceptują kompozyt FRP jako coraz częściej tańszą alternatywę dla tradycyjnych rozwiązań mostowych.



Fot. 2. Montaż przęseł kładki: a) transport przęseł; b) montaż przęseł za pomocą dźwigów; c) wszystkie przęseł kładki na podporach



Fot. 3. Montaż światłowodów: a) w laminacie okładziny dolnej; b) w laminacie żebra

Piśmiennictwo

1. Siwowski T., Rajchel M., Kalenta D., Własak L.: *Pierwszy polski most drogowy z kompozytów FRP. Projekt, badania, budowa*. „Mosty”, 2/2016, s. 62-66.
2. Siwowski T.: *Mosty z kompozytów FRP. Kształtowanie, projektowanie, badania*. PWN, Warszawa, 2018.
3. Chróścielewski J., Miśkiewicz M., Pyrzowski Ł., Wilde K.: *Badania kompozytowego mostu dla pieszych*. „Mosty”, 1/2016, s. 44-49.
4. *Technologia kompozytowa do prefabrykowania gotowych przęseł na przykładzie kładek pieszo-rowerowych w Iławie*. „Mosty”, 3-4/2019, s. 85-86.
5. *Modernizacja mostu Siekierki – Neurüditz*. „Mosty”, 2/2021, s. 59-60.
6. Wąchalński K.: *Projekt remontu i poszerzenia historycznego mostu im. J. Piłsudskiego przez Wisłę w Toruniu*. „Mosty”, 1/2021, s. 50-75.
7. Radomski W., Kasprzak A.: *Poszerzenie mostów*. PWN, Warszawa, 2017.

dowisku SOFiSTiK (rys.3). Laminaty i żebra były modelowane 4-węzłowymi, powłokowymi elementami skończonymi Timoszenko-Reissnera o dwuliniowych funkcjach kształtu ze wzbogaceniem stanu deformacji eliminującym efekt blokady, uwzględniającymi efekt ścinania. Elementom powłokowym przypisano projektowaną grubość oraz sekwencją ułożenia poszczególnych lamin. Własności elementów powłokowych przyjęto na podstawie wyników badań materiałowych oraz projektowanych sekwencji lamin w każdym elemencie. Docelowe, globalne parametry materiałowe dla poszczególnych elementów skończonych były wyznaczane jako wypadkowe, zgodnie z klasyczną teorią laminacji. Wpływ pianki rdzenia jako materiału wypełniającego został konserwatywnie pominięty w modelu.

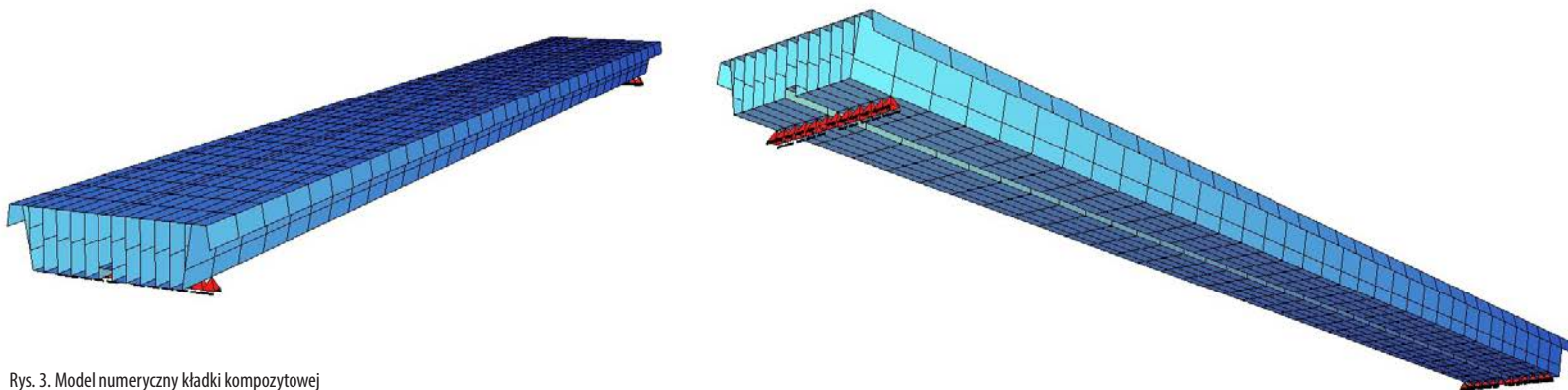
W zakresie SGN sprawdzeniu podlegała nośność laminatów kompozytowych za pomocą wybranych kryteriów wytrzymałościowych (*Tsai-Hill, Tsai-Wu*) oraz stateczność laminatów żeber. Nośność laminatu dolnego jest wykorzystana w 56%, laminatu górnego w 18%, natomiast laminatu żeber w 69%. Ocena stateczności laminatów żeber polegała na ustaleniu krytycznej siły ściskającej i ścinającej wg [10]. Nośność żeber ze względu na ich stateczność jest wykorzystana w 91%. Sprawdzone również połączenie balustrady z bocznym laminatem zewnętrznym (kołnierzem) w zakresie nośności połączenia śrubowego oraz nośności laminatu z otworami. Maksymalne wyłączenie połączenia wyniosło 54%.

W zakresie SGU sprawdzono częstotliwości drgań własnych, ograniczenie odkształceń oraz ugięcie przęseł. Pierwszą podstawową częstotliwość drgań własnych

wyznaczono dla konstrukcji obciążonej i nieobciążonej, która wyniosła odpowiednio 3,11 Hz oraz 2,9 Hz. Maksymalne ugięcie przęseł pod obciążeniem charakterystycznym wyniosło 49 mm, a zatem warunek dopuszczalnego ugięcia ($L/300$) był wykorzystany w 62%. Poziom komfortu kładki TC2 oceniany wg [11] został spełniony.

Technologia wykonania

Przęseł kładki zostały wytworzone metodą infuzji próżniowej VARTM (ang. *vacuum assisted resin transfer moulding*) [2] w warsztacie firmy FiberCore Europe B.V. w Rotterdamie, Holandia. Każde z nich powstało w specjalnej formie, w której zostały ułożone tkaniny szklane w sekwencjach koniecznych do uzyskania projektowanych grubości laminatów. Pomiędzy tkaninami zostały umieszczone elementy piankowe rdzenia o wysokości 850 mm, których głównym zadaniem było uformowanie wzajemnie połączonych laminatów okładzinowych oraz pionowych laminatów żeber wewnętrznych rdzenia. Po ułożeniu w formie wszystkich materiałów została ona uszczelniona, a następnie rozpoczął się proces infuzji, polegający na przesyceniu zawartości formy płynną żywicą poliestrową z wykorzystaniem próżni. Po wypełnieniu formy żywicą jej dopływ został zamknięty i rozpoczął się proces utwardzania się (sieciovania) żywicy. Po całkowitym utwardzeniu przęseł było wyciągane z formy na stanowisko do wykończenia i zabezpieczenia powierzchni zewnętrznej laminatów. Na tym stanowisku wykonano również chemoutwardzalną nawierzchnię kładki. Wszystkie przęseł kładki zostały przewiezione dwoma zestawami transportowymi z wytwórni w Rotterdamie do Rzeszowa. Z uwagi na stosunkowo niewielki ciężar przęseł (masa pojedynczego przęseł wynosi ok. 10 t) był możliwy równoczesny transport dwóch przęseł na jednym zestawie ciągnika. Montaż przęseł wykonano bezpośrednio z naczepy ciągnika (tzw. montaż z kół) na uprzednio zamontowanych wspornikach stalowych, stanowiących bezpośrednie podpory przęseł (fot. 1). Przęseł na podporach zostały ustabilizowane za pomocą sworzni stalowych $\phi 36$ mm, które zostały umieszczone w specjalnych gniazdach, utworzonych w laminatach dolnych przęseł. Część gniazd została wykonana „na wymiar”, blokując możliwość przesuwu konstrukcji, natomiast część została wykonana z odpowiednimi „luzami”, zapewniającymi możliwość swobodnej pracy przęseł pod obciążeniem oraz wskutek oddziaływania temperatury. Montaż pojedynczego przęseł kładki trwał ok. 30 min (fot. 2).



Rys. 3. Model numeryczny kładki kompozytowej

System monitoringu

Ze względu na pionierski charakter oraz rozmiary konstrukcji kompozytowej zaplanowano monitoring ciągły pracy kładki podczas jej eksploatacji. Do monitoringu zaprojektowano i wdrożono system oparty na włóknach światłowodowych DFOS (*ang. distributed fibre optic sensors*) [13]. Kompozytowe przęsła kładki zostały wyposażone w czujniki pomiarowe w postaci włókien jednomodowych typu SM9/125 w powłoce akrylowej. Układ włókien podzielono ze względu na orientację czujnika na włókna podłużne, włókna poprzeczne oraz włókna pionowe. Dwie pierwsze grupy zostały umieszczone w płaszczyźnie laminatów okładzinowych, górnego i dolnego. Włókna pionowe umieszczono w płaszczyznach śródników trzech żeber pionowych i zorientowano w kierunku naprężeń głównych ($\pm 45^\circ$). Układ czujników światłowodowych przedstawiono na rys. 4. W sumie w konstrukcji pojedynczego przęsła umieszczono ponad 500 m czujników światłowodowych, które mogą mierzyć odkształcenia konstrukcji w odstępach co 5 mm. Dzięki temu cały system pomiarowy DFOS jest równoważny systemowi zawierającemu ponad 100 tys. czujników punktowych. Ponadto dzięki odpowiedniemu podziałowi czujników światłowodowych, pomiar może zostać ograniczony do mniejszej liczby punktów (np. tylko w niewralgicznych przekrojach/punktach) lub do lokalnego fragmentu konstrukcji (np. strefa podparcia).

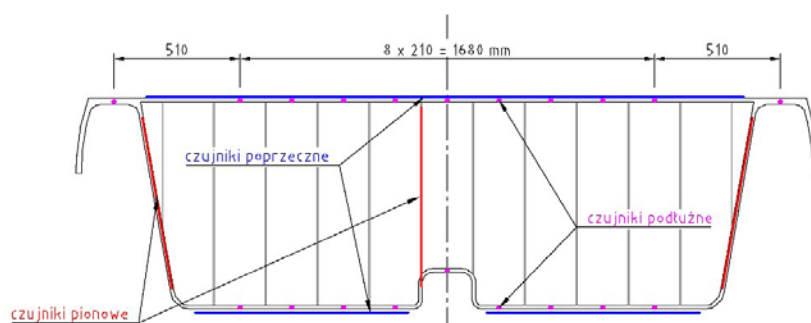
W odróżnieniu od klasycznych czujników pomiarowych, które są montowane na gotowej konstrukcji, w systemie DFOS włókna światłowodowe zostały umieszczone wewnątrz konstrukcji pomiędzy tkaninami laminatów, jeszcze przed procesem infuzji. Z tego względu nie są narażone na uszkodzenia lub zniszczenie na skutek oddziaływania środowiska lub aktów wandalizmu, a cały system pomiarowy cechuje się wysoką trwałością. Dla ograniczenia ingerencji w strukturę laminatów, czujniki światłowodowe były stosowane bez osłon (fot. 3). Dzięki temu zmniejszono średnicę czujników z kilku milimetrów do 250

μm , ograniczając zagrożenie wprowadzania karbów konstrukcyjnych osłabiających laminaty. Do włókien pomiarowych zostały dospawane końcówki przyłączeniowe, które zostały wzmocnione osłonami w kolorze żółtym, co umożliwiło wyprowadzenie ich z konstrukcji. Montaż czujników odbywał się przy ciągłej kontroli ciągłości światłowodów z użyciem testerów laserowych. Po infuzji konstrukcji kompozytowej końcówki czujników zostały tymczasowo zabezpieczone na czas transportu, a po montażu przęsła na placu budowy zostały umieszczone w skrzynce zamocowanej do konstrukcji.

Podsumowanie

Otwarcie kładki dla rowerzystów jest planowane we wrześniu 2021 r. Przed oddaniem obiektu użytkownikom Katedra Dróg i Mostów PRz wykona tzw. próbną obciążenie konstrukcji, podczas którego zostaną sprawdzone wszystkie założenia projektowa, a także zachowanie konstrukcji kładki pod obciążeniem statycznym i dynamicznym (w tym tzw. wandalistycznym). Próbną obciążenie zostanie wykorzystane także do sprawdzenia działania systemu monitoringu światłowodowego DFOS i zebrania pierwszych (tzw. zerowych) odczytów odkształceń, umożliwiających w przyszłości monitoring stanu technicznego i zachowania się kładki pod obciążeniem. Po oddaniu kładki użytkownikom KDiM PRz będzie prowadzić stały monitoring konstrukcji kompozytowej, zbierając dane o zachowaniu się w czasie tej innowacyjnej konstrukcji. \square

8. Siwowski T., Kulpa M., Rajchel M., Kaleta D.: *Nowy most drogowy z kompozytów FRP*. „Mosty”, 3-4/2017, s. 27-31.
9. Pilarczyk K.: *Sposoby wykorzystania płyt kompozytowych InfraCore® Inside w konstrukcjach obiektów mostowych*. „Mosty”, 5/2019, s. 74-75.
10. *Prospect for New Guidance in the Design of FRP Structures (Eurocodes)*. European Composites Industry Association (EuCIA). Brussels 2019.
11. BD 90/05: *Design Manual for Roads and Bridges*. Vol. 1, Sec. 3, Part 17: *Design of FRP bridges and highways structures*. The Highways Agency, Scottish Executive, Welsh Assembly Government, The Department for Regional Development Northern Ireland, 2005.
12. EUR 23984. *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*. JRC53442, European Commission, Luxembourg 2009.
13. Siwowski T., Sierńko R., Bednarski G.: *System monitorowania mostów kompozytowych z wykorzystaniem światłowodowych czujników odkształceń*. „Mosty”, 5/2017, s. 50-53.



Rys. 4. Układ czujników światłowodowych: a) w przekroju poprzecznym; b) w widoku z góry na laminat okładzinowy górny