

# System monitorowania mostów kompozytowych z wykorzystaniem światłowodowych czujników odkształceń

dr hab. inż. Tomasz Siwowski,  
prof. PRz

Politechnika Rzeszowska

dr inż. Rafał Sienko

Politechnika Krakowska

dr inż. Łukasz Bednarski

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

napisz do autorów: siwowski@prz.edu.pl

rsienko@pk.edu.pl

lukaszbedn@agh.edu.pl

**Wysoka wytrzymałość i trwałość kompozytów FRP powodują, że materiał ten coraz częściej jest stosowany w budownictwie mostowym. Istnieje jednak ryzyko powstania uszkodzeń konstrukcyjnych (np. pęknięcia międzywarstwowe, degradacja matrycy). W artykule opisano wykorzystanie technologii światłowodowej do rozłożonych pomiarów odkształceń mostu FRP w czasie obciążenia próbnego, zrealizowanych przy współpracy Politechniki Rzeszowskiej i firmy SHM System.**

**W** wyniku projektu „Com-Bridge” współfinansowanego przez NCBiR w ramach programu DEMONSTRATOR+ ([www.com-bridge.pl](http://www.com-bridge.pl)) Polska dołączyła do wąskiego grona państw, w których są w eksploatacji mosty drogowe wykonane z kompozytów FRP (ang. *fibre reinforced polymer*). W latach 2015-2016 konsorcjum naukowo-przemysłowe pod kierunkiem Mostostalu Warszawa zbudowało dwa mosty kompozytowe zlokalizowane w ciągu dróg publicznych na Podkarpaciu [1-2]. Z konstrukcyjnego punktu widzenia do największych zalet kompozytów FRP należą m.in.: wysoka wytrzymałość, doskonała trwałość, duża sztywność (w przypadku kompozytu z włókien węglowych) oraz mała masa konstrukcji, a co za tym idzie – łatwość i szybkość jej wznoszenia. Te cechy kompozytów FRP powodują, że materiał ten coraz częściej jest stosowany w budownictwie mostowym, szczególnie w przypadkach, gdy o wyborze rodzaju konstrukcji decydują całkowite koszty liczone w cyklu życia. Dzięki zastosowaniu w obiektach mostowych bardzo wytrzymałych, lekkich i odpornych na korozję konstrukcji z materiałów kompozytowych jest możliwe znaczące podniesienie nośności obiektów oraz zwiększenie trwałości i niezawodności.

Z drugiej strony wiadomo, że kompozyty FRP są materiałami podatnymi na takie uszkodzenia, jak: delaminacja, pęknięcia międzywarstwowe czy degradacja matrycy, które mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń strukturalnych konstrukcji. Jest wiele przyczyn mogących wywoływać takie uszkodzenia: przeciążenie mostu, uderzenie, zmęczenie, degradacja środowiskowa kompozytu, wady materiałowe lub niewłaściwa jakość produkcji elementu. Uszkodzenia kompozytów mają wymiary mierzone w mikronach i najczęściej powstają pomiędzy poszczególnymi warstwami lub na granicy faz włókno/żywicą, dlatego są niewidoczne podczas rutynowych przeglądów konstrukcji i nie można ich wykryć za pomocą konwencjonalnego sprzętu NDT oraz typowych czujników odkształceń, przemieszczeń czy akcelerometrów. Co więcej, system przeglądów mostów w Polsce wymaga wykonywania przeglądów szczegółowych co 5 lat, a uszkodzenia kompozytów powstałe w okresie pomiędzy przeglądami mogą propagować, prowadząc do nagłych i kruchych pęknięć, mogących zagrazić bezpieczeństwu mostu. Wiele systemów monitorowania SHM (ang. *structural health monitoring*) opartych na różnych technologiach pomiarowych powstało w celu kontrolowania konstrukcji kompozytowych, stosowanych głównie w lotnictwie, elektrowniach wiatrowych (turbiny) czy budownictwie, w tym mostownictwie [3]. Wśród tych, które już znalazły zastosowanie w monitoringu mostów kompozytowych, można wymienić m.in.: termografię podczerwieni [4], ultradźwięki [5], emisję akustyczną [6] oraz światłowody [7]. W ramach projektu „Com-Bridge” na obu mostach kompozytowych wdrożono oraz rozpoczęto testowanie trzech technologii: emisji akustycznej, technologii strunowej oraz technologii światłowodowej. Pierwszą z nich testuje Politechnika Warszawska [8], dwie pozostałe – Poli-

## SUMMARY

### Composite bridges structural health monitoring system using optical fibre strain sensors

High strength and durability of FRP (fibre reinforced polymer) composites make this material increasingly applied in bridge construction. However, there is a risk of structural damage (e.g. cracks between layers, matrix degradation). The paper describes the application of optical fibre technology for distributed strain measurements of an FRP bridge during its load test, conducted in cooperation between the Rzeszów University of Technology and the SHM System company.

**Keywords:** optical fibres, distributed measurements, strains, FRP composites, bridge

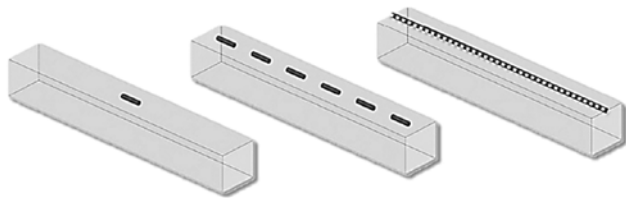
technika Rzeszowska wraz z krakowską firmą SHM System. W artykule opisano wykorzystanie technologii światłowodowej do pomiaru odkształceń podczas wykonywania obciążenia próbnego jednego z mostów. System będzie podstawą do prowadzenia monitoringu jego konstrukcji podczas eksploatacji.

### System monitorowania konstrukcji mostu

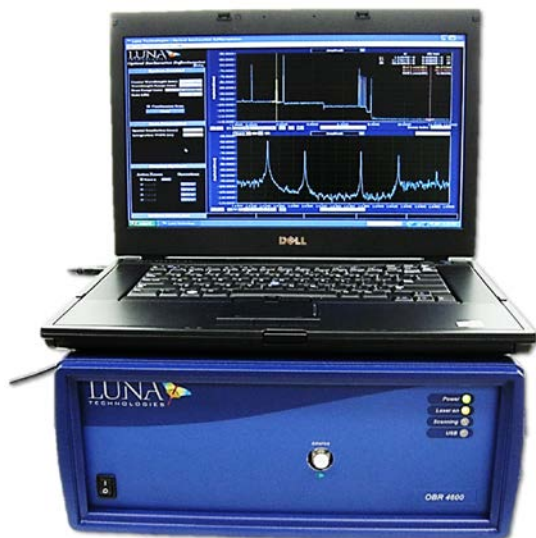
Do monitoringu konstrukcji mostu kompozytowego zastosowano technologię pomiarową, wykorzystującą rozłożone czujniki światłowodowe DFOS (ang. *distributed fibre optic sensors*) [9]. Jest to jeden z rodzajów czujników światłowodowych, który oprócz czujników interferometrycznych i czujników z naniesioną siatką Bragga znalazł ostatnio zastosowanie w monitoringu konstrukcji mostowych [10]. Światłowodowa technika pomiarowa umożliwia wykonywanie pomiarów quasi-ciągłych, polegających na rozmieszczeniu kilku, kilkunastu punktów pomiarowych na długości pojedynczego światłowodu (siatki Bragga) oraz pomiarów rozłożonych, tzn. takich, w których długości wirtualnych czujników oraz ich odległości są tak małe (rzędu 5-10 mm), że z inżynierskiego punktu widzenia można uznać je za pomiary geometrycznie ciągłe [11]. Takie podejście umożliwia zastąpienie tysięcy tradycyjnych czujników pojedynczym włóknem światłowodowym. Przykładowo na długości 1 m możliwe jest uzyskanie informacji o wartości odkształceń nawet w 200 punktach pomiarowych.

W budowie czujników rozłożonych wykorzystuje się liniowe i nieliniowe zjawiska występujące w światłowodach. Do zjawisk liniowych zalicza się rozpraszanie Rayleigha, natomiast do nieliniowych należą rozpraszanie Ramana i rozpraszanie Brillouina. Do współpracy z czujnikami rozłożonymi stosuje się reflektometrię optyczną w dziedzinie czasu, których zasada działania opiera się na radarowym pomiarze odległości. W ostatnich latach duży wzrost zainteresowania czujnikami rozłożonymi wiąże się z potrzebami monitorowania stanu technicznego rozległych konstrukcji inżynierskich, w tym mostów [12].

W badaniach mostu kompozytowego wykorzystano czuj-



Rys. 1. Graficzna interpretacja pomiaru punkowego, quasi-ciągłego oraz ciągłego (rozłożonego)



Rys. 2. Reflektometr optyczny LUNA OBR 4600 wraz z laptopem z zainstalowanym oprogramowaniem do przetwarzania sygnału pomiarowego

niki rozłożone, a jako włókna pomiarowe zastosowano jednomodowe światłowody telekomunikacyjne. Odczyt informacji z czujników wykonywany był przy zastosowaniu reflektrometru optycznego OBR 4600 firmy Luna (rys. 2, tab. 1). Urządzenie przetwarza sygnał z wykorzystaniem zjawiska rozpraszania Rayleigha. Zarejestrowany sygnał [dB] reflektometr przelicza na odkształcenia. W przeprowadzonych badaniach przyjęto wirtualne odcinki pomiarowe o długości 10 mm, które rozmieszczono na długości światłowodu co 10 mm (odległość środków odcinków).

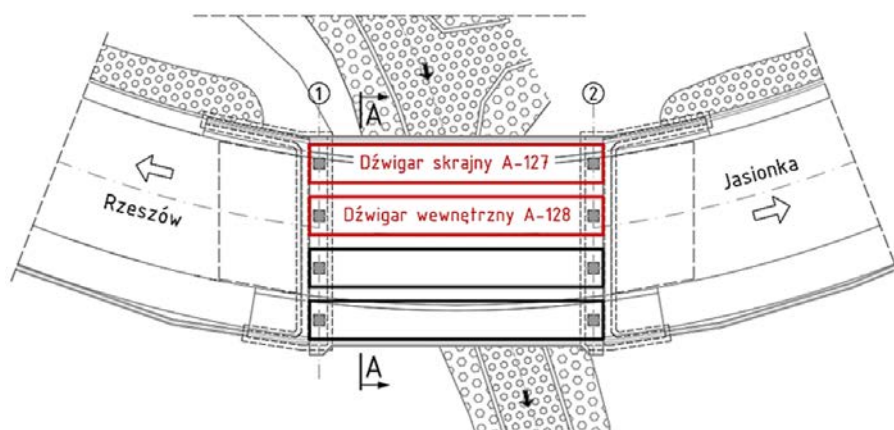
### Opis badanego mostu

Badany most jest obiektem jedoprzęsłowym, swobodnie podpartym. Główne parametry techniczne mostu są następujące: rozpiętość teoretyczna przęsła – 10,0 m; długość całkowita pomostu – 10,7 m; całkowita szerokość mostu – 7,7 m; szerokości użytkowe: jezdnia – 5 m (2 x 2,5 m), opaska bezpieczeństwa – 2 x 0,5 m; chodnik – 0,75-1,1 m; balustrada z gzymsiem – 2 x 0,25 m. Most ma nośność 30 ton (rys. 3).

Przęsło mostu jest wykonane z czterech dźwigarów kompozytowych o przekroju skrzynkowym (typu U) w rozstawie osiowym 1,9 m oraz zespolonej z dźwi-



Rys. 3. Widok mostu kompozytowego



Rys. 4. Lokalizacja badanych dźwigarów na widoku z góry obiektu mostowego

garami kompozytowej płyty pomostu. Dźwigary główne mają następujące wymiary: wysokość – 0,71 m, szerokość w poziomie pasa górnego – 1,38 m oraz szerokość w poziomie pasa dolnego – 0,60 m. Środniki dźwigarów są kompozytem warstwowym, składającym się z dwóch zewnętrznych laminatów oraz przekładki z pianki PVC. Wnętrze przekrojów skrzynkowych dźwigarów usztywniono przeponami w rozstawie 1,25 m. Wszystkie laminaty dźwigarów wykonano w całości z kompozytu na bazie włókien szklanych i żywicy epoksydowej. Kompozytowa płyta pomostu ma grubość 0,13 m, szerokość 7,56 m i długość 10,7 m. Płyta jest kompozytem warstwowym typu sandwich, składającym się z dwóch zewnętrznych laminatów oraz przekładki z pianki PUR, usztywnionej kompozytowymi żebrami wewnętrznymi. Płytę w całości wykonano z kompozytu z włókien szklanych i żywicy epoksydowej. Na kompozytowej płycie pomostu zostały wykonane kapy chodnikowe grubości od 0,15 do 0,18 m, ograniczone od strony jezdni krawęż-

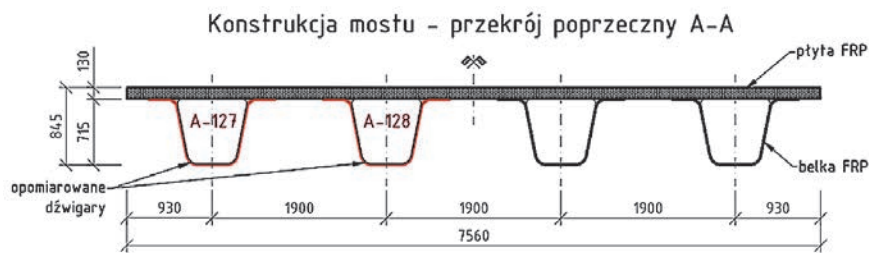
### Piśmiennictwo

1. Siwowski T., Rajchel M., Kaleta D., Własak L.: *Pierwszy polski most drogowy z kompozytów FRP. Projekt, badania, budowa*. „Mosty”, 2/2016.
2. Siwowski T., Kaleta D., Kulpa M., Rajchel M.: *Nowy most drogowy z kompozytów FRP*. „Mosty”, nr 3-4/2017.
3. Wentzel H.: *Health Monitoring of Bridges*. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
4. Halabe U.B., Vasudevan A., Klinkhachorn P., GangaRao H.V.S.: *Detection of subsurface defects in fiber reinforced polymer composite bridge decks using digital infrared thermography*. „Nondestructive Testing And Evaluation”, Vol. 22, Issue 2-3/2007.

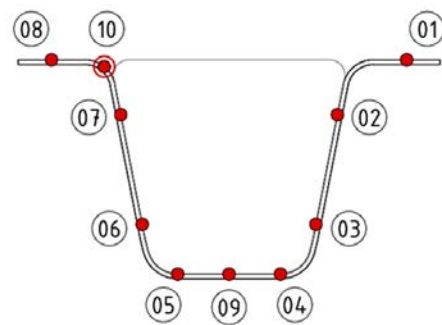
| Model                               | OBR 4600     |
|-------------------------------------|--------------|
| Maksymalny zasięg pomiaru           | 30 lub 70 m  |
| Zakres fali                         | 1270-1340 nm |
|                                     | 1525-1610 nm |
| Zalecana rozdzielczość przestrzenna | ± 1,0 cm     |
| Rozdzielczość odkształceń           | ± 1,0 µε     |
| Rozdzielczość temperatury           | ± 0,1 °C     |

Tab. 1. Wybrane parametry techniczne reflektrometru optycznego LUNA OBR 4600

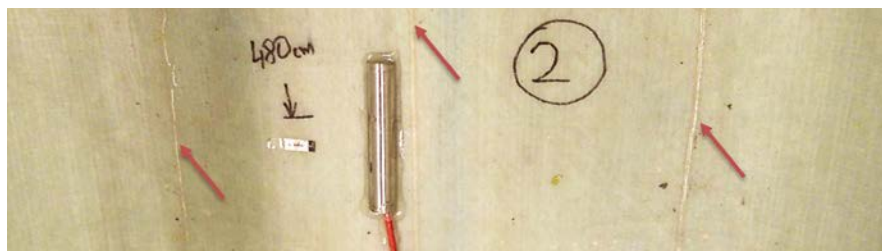
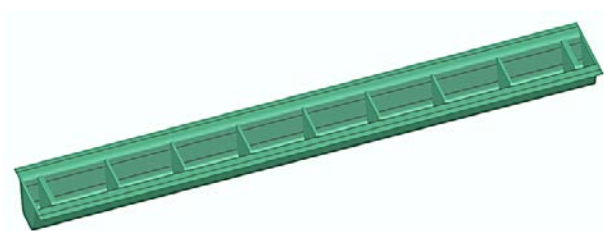




Rys. 5. Widok badanych dźwigarów w przekroju poprzecznym konstrukcji mostu



Rys. 6. Rozmieszczenie włókien światłowodowych oraz ich numeracja w przekroju dźwigara



Rys. 7. Wizualizacja pojedynczego dźwigara z włóknami światłowodowymi w widoku z góry

Rys. 8. Prowadzenie włókien światłowodowych na dolnej części powłoki dźwigara (od strony wewnętrznej)

5. Mufti A.A., Neale K.W.: *State-of-the-art of FRP and SHM applications in bridge structures in Canada*. COMPOSITES & POLYCON 2007, American Composites Manufacturers Association, October 17-19, 2007, Tampa, FL USA.
6. Gostautas R.S., Ramirez G., Peterman R.J., Meggers D.: *Acoustic emission monitoring and analysis of glass fiber-reinforced composites Bridge Decks*. „Journal of Bridge Engineering”, Volume 10, Issue 6, November 2005.
7. Wang Y., Li Y., Ran J., Cao M.: *Experimental investigation of a self-sensing hybrid GFRP-concrete bridge superstructure with embedded FBG sensors*. „International Journal of Distributed Sensor Networks”, Volume 2012, Article ID 902613.
8. Karczewski R., Gołębiowski Ł., Molak R., Płowiec J., Spychalski W.L.: *Acoustic emission in monitoring composite bridge structures*. „Composites Theory and Practice”, Vol. 15, No. 2, 2015.
9. Samiec D.: *Distributed fibre-optic temperature and strain measurement with extremely high spatial resolution*. Photonic International, 2012.

nikami kamiennymi natomiast od strony zewnętrznej deskami gzymsowymi z polimerobetonu. Od strony zewnętrznych krawędzi pomostu zamontowano stalowe balustrady systemowe o wysokości 1,1 m. Przyczółki mostu posadawiono na mikropalach o średnicy 110 mm i długości 4,0 m i zatopiono w nasypach dojazdów, które ze względu na ograniczenia terenowe są częściowo umocnione murami oporowymi.

### System pomiaru odkształceń

Badaniom poddano dwa dźwigary (wewnętrzny o numerze A-128 oraz skrajny A-127), a także jeden panel płyty pomostu o numerze A-100, zlokalizowany pomiędzy tymi dźwigarami (rys. 4-5). W artykule zaprezentowano głównie wyniki pomiarów zarejestrowane dla dźwigara skrajnego. Na każdym z badanych dźwigarów zainstalowano po 10 odcinków pomiarowych światłowodów (rys. 6), przy czym na dwa odcinki wykorzystano jedno włókno zapętlone na końcu. Długość odcinków pomiarowych światłowodów wynosi 9,60 m ( $\pm 0,10$  m) i są one rozmieszczone symetrycznie względem środka rozpiętości mostu (rys. 7-8). Część włókna o numerze 10 została swobodnie umieszczona w rurce polipropylenowej celem wykonania pomiarów temperatury. Odczyty odkształceń realizowane były zatem w blisko 20 000 wirtualnych odcinkach pomiarowych – czujnikach odkształceń. Na płycie pomostu zlokalizowanej pomiędzy dźwigarami A-127 i A-128 zainstalowano łącznie dwa włókna światłowodowe: po jednym na dolnej i górnej powierzchni. Utworzono odcinki pomiarowe prostopadłe i równoległe do głównego kierunku pracy płyty (rys. 9). Końcówki wszystkich włókien światłowodowych wprowadzono nad jedną z podpór mostu, na końcu przęsła.

### Wyniki pomiarów odkształceń

Obciążenie próbne mostu kompozytowego zostało zrealizowane 30.11.2016 roku. Do badań statycznych użyto dwa samochody ciężarowe czteroosiowe o masie pojazdu z ładunkiem ok. 32 ton i masie łącznej podczas badań ok. 64 tony. Podczas badań były mierzone i rejestrowane w sposób konwencjonalny wartości: przemieszczeń pionowych dźwigarów, odkształceń kompozytu, przemieszczeń łożysk oraz osiadań podpór. Badania mostu podzielono na następujące etapy:

- **Etap 0** – konstrukcja bez obciążenia.
- **Etap I** – samochód ciężarowy o masie równej ok. 32 tony.

- **Etap II** – dwa samochody ciężarowe o łącznej masie równej ok. 64 tony.
- **Etap III** – konstrukcja po odciążeniu.

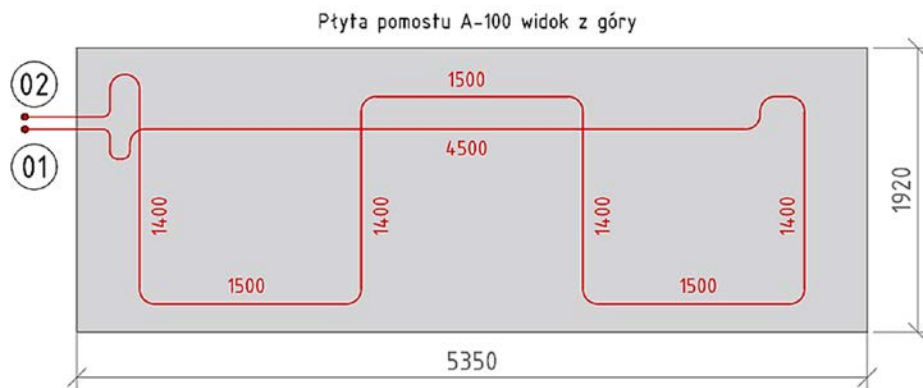
Światłowodowe odcinki pomiarowe odczytywano jednokanałowym reflektometrem. Ze względu na czasochłonność tego procesu zrezygnowano z odczytów w pierwszym etapie obciążenia. Łącznie wykonano zatem trzy pomiary: pomiar zerowy (odniesienia), pomiar konstrukcji obciążonej w etapie II oraz pomiar konstrukcji po odciążeniu w etapie III.

W analizie wyników pomiarów przyjęto konwencję znakowania, według której odkształcenia odpowiadające rozciąganiu (względem pomiaru zerowego) mają przypisany znak „+”, a odkształcenia odpowiadające ścisaniu – znak „-”. Pomiary nie były kompensowane z uwagi na oddziaływanie temperatury ze względu na jej niewielką zmianę podczas prowadzonych pomiarów (rzęd 1°C). Istnieje oczywiście możliwość przeprowadzenia takich obliczeń, uwzględniających wartości temperatury zmierzonej przez termistory zintegrowane z czujnikami strunowymi oraz wartości odkształceń termicznych zmierzonych przez światłowodowe włókno kompensacyjne nr 10.

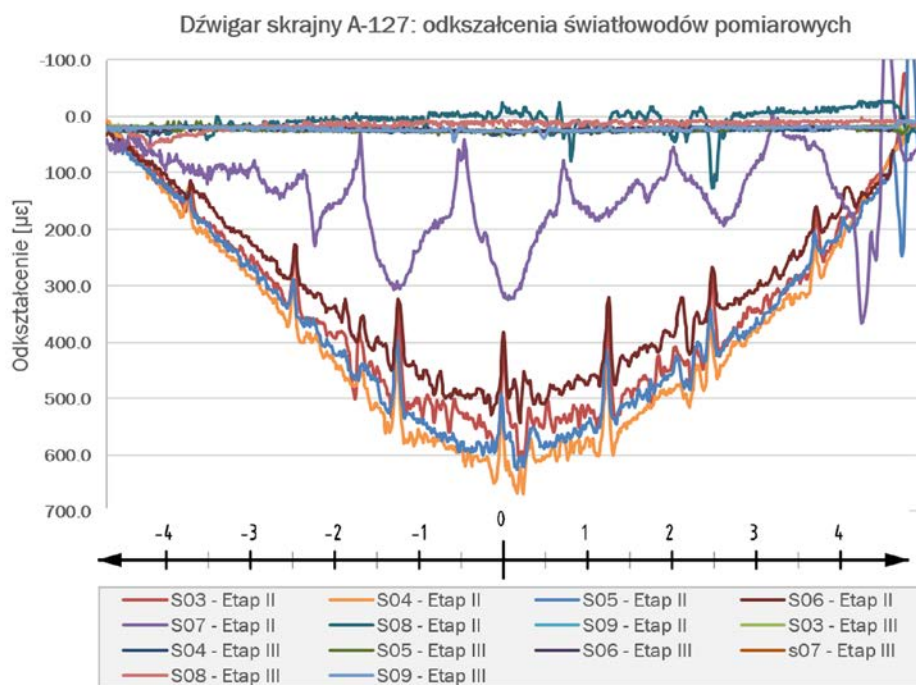
Na rys. 10 pokazano zbiorcze wyniki pomiarów czujnikami światłowodowymi odkształceń w dźwigarze skrajnym A-127. Na rys. 11 zaprezentowano przebieg odkształceń zarejestrowanych w pasie dolnym tego samego dźwigara odcinkiem światłowodu o nr 09 oraz przebieg odkształceń termicznych pomierzonych odcinkiem o nr 10. Charakterystyczne zaburzenia ciągłości wykresów powodowane są obecnością przepon usztywniających. Małe zmiany temperatury w czasie pomiarów spowodowały pomijalnie małe zmiany odkształceń termicznych.

### Podsumowanie

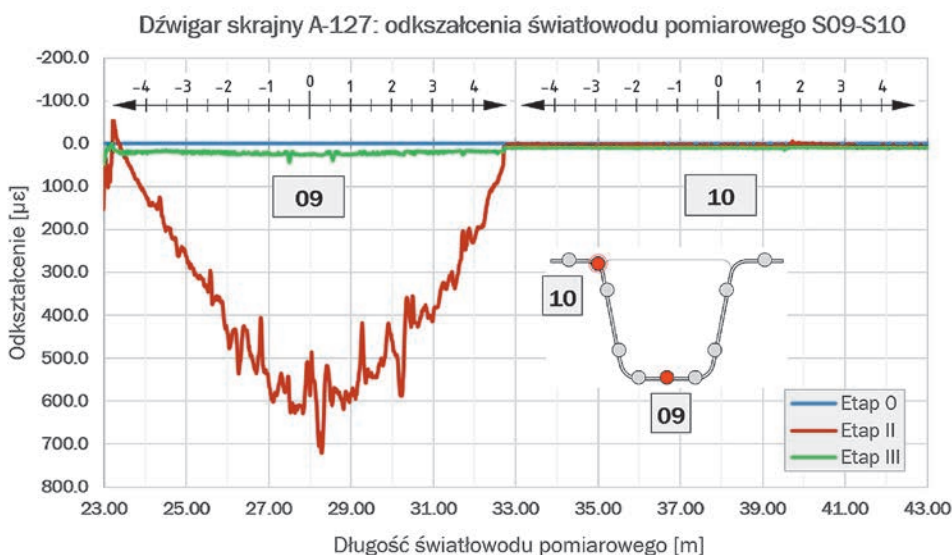
Pomiar odkształceń konstrukcji kompozytowej za pomocą rozłożonych czujników światłowodowych okazał się bardzo efektywną, wydajną oraz dokładną metodą oceny stanu odkształceń dźwigarów kompozytowych przęsła mostu. Dzięki zastosowanej technologii możliwa jest kontrola konstrukcji w nieporównywalnie większym stopniu niż w przypadku punktowych czujników konwencjonalnych (np. tensometrów elektrooporowych). Porównanie z wynikami pomiarów tensometrycznych w odpowiednich punktach dźwigarów wykazało, że różnice nie przekraczają 5%, co przy generalnej dokładności pomiaru odkształceń jest wartością akceptowalną. Pew-



Rys. 9. Schemat rozmieszczenia włókien światłowodowych na dolnej i górnej powierzchni płyty pomostu oraz ich numeracja



Rys. 10. Dźwigar skrajny A-127: zbiorczy wykresy odkształceń w poszczególnych etapach



Rys. 11. Dźwigar skrajny A-127: odkształcenia światłowodu pomiarowego S09 i S10

10. Matta F., Bastianini F., Galati N., Casadei P., Nanni A.: *Distributed strain measurement in steel bridge with fiber optic sensors: validation through diagnostic load test.* „Journal of Performance of Constructed Facilities”, Vol. 22, No. 4, August 2008.

11. López-Higuera J., Cobo L., Incera A., Cobo A.: *Fiber optic sensors in structural health monitoring.* „Journal of Lightwave Technology”, Vol. 29, No. 4, 2011.

12. Bednarski Ł., Sierńko R., Howiacki T.: *Wybrane zagadnienia monitorowania konstrukcji.* XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 25-28.03.2015 r.

ną wadą technologii, wynikającą w tym przypadku z rodzaju zastosowanego reflektometru (jednokanałowego), jest dłuższy czas niezbędny do wykonania pomiaru. Na obecnym etapie rozwoju techniki światłowodowej pozostawienie reflektometru na obiekcie mostowym nie jest jeszcze możliwe z uwagi na jego znaczny koszt. Dlatego do budowy systemu monitorowania odkształceń mostu zastosowano uzupełniająco technikę strunową

do ciągłego w czasie i automatycznego pomiaru odkształceń punktowych (system wczesnego ostrzegania) oraz technikę światłowodową do ciągłego pomiaru odkształceń w sensie geometrycznym, realizowanego dyskretnie w czasie. W ciągu pierwszego roku eksploatacji mostu planuje się kilkukrotne pomiary z wykorzystaniem czujników światłowodowych w celu oceny zmian odkształceń kompozytu w czasie eksploatacji mostu. □