

Tomasz SIWOWSKI¹
Rafał SIENKO²
Łukasz BEDNARSKI³
Mateusz RAJCHEL⁴
Tomasz HOWIACKI⁵

ŚWIATŁOWODOWE POMIARY ODKSZTAŁCEŃ ELEMENTÓW MOSTÓW KOMPOZYTOWYCH NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH BADAŃ

1. Wprowadzenie

Ostatnie lata w projektowaniu, wykonawstwie i eksploatacji konstrukcji inżynierskich przyniosły wzrost zastosowań nowoczesnych rozwiązań, których celem jest przede wszystkim zoptymalizowanie nakładów finansowych związanych nie tylko z samym procesem budowy, ale rozpatrywanych w całym cyklu życia konstrukcji. Poszukuje się nowych materiałów, których bardzo dobre parametry mechaniczne oraz wykorzystanie zalet prefabrykacji spowoduje, że będą mogły być stosowane powszechnie. Do takich nowoczesnych materiałów zaliczyć można kompozyty FRP (*ang. fibre reinforced polymer*), które ze względu na niewielki ciężar własny, wysoką wytrzymałość, odporność na korozję i warunki zewnętrzne, a także bardzo wysoką trwałość, znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie mostowym. Dwa pierwsze obiekty [1, 2] powstały w Polsce w latach 2015-2016 w wyniku prac prowadzonych przez konsorcjum naukowo-przemysłowe pod kierownictwem Mostostalu Warszawa w czasie realizacji projektu „Com-Bridge”, współfinansowanego przez NCBiR w ramach programu DEMONSTRATOR+.

Optymalizacja konstrukcji (np. z uwagi na wymiary przekroju poprzecznego, ciężar, kształt elementów, sposób ich połączenia) powinna być prowadzona nie tylko na podstawie laboratoryjnych badań materiałów stosowanych do jej budowy, ale przede wszystkim na podstawie analizy pracy rzeczywistej konstrukcji w warunkach eksploatacji in-situ. Stąd, obiekty mostowe charakteryzujące się niestandardowymi rozwiązaniami materiałowymi, geometrycznymi czy konstrukcyjnymi, bardzo często wyposażane są w automatyczne systemy monitorowania sposobu ich pracy [3, 4]. W przypadku mostów kompozytowych

¹ dr hab. inż., prof. PRz, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej

² dr inż. Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej

³ dr inż. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

⁴ mgr inż. Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej

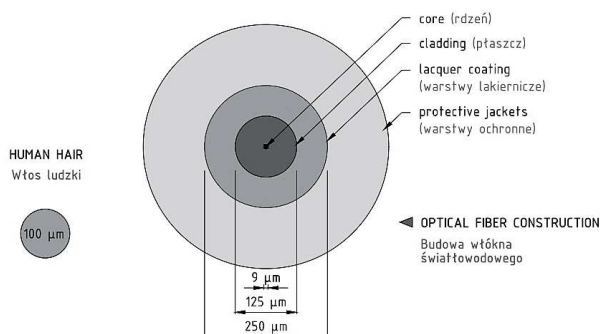
⁵ mgr inż., SHM System Sp. z o. o., Sp. komandytowa

badane były różne techniki pomiarowe [5, 6, 7, 8], z których szczególnie duże nadzieje budzi technika światłowodowa [9, 10], umożliwiająca realizowanie pomiarów odkształceń i temperatury w sposób geometrycznie ciągły (*ang. distributed measurements*) wzdłuż całej długości włókna pomiarowego. Takie podejście pozwala efektywnie zastąpić setki tradycyjnych, punktowych czujników odkształceń za pomocą pojedynczego światłowodu telekomunikacyjnego [11], dostarczając zupełnie nowych możliwości w analizie i interpretacji pracy elementów konstrukcyjnych.

Technika światłowodowa jest intensywnie rozwijana w wielu jednostkach badawczych na całym świecie, również w Polsce. Obecnie firma SHM System z Krakowa realizuje projekt badawczy w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, pt. „Opracowanie nowego czujnika światłowodowego umożliwiającego wyznaczanie profili pionowych i poziomych przemieszczeń badanych obiektów na odcinkach o długości do 120 km”, nr proj. POIR.01.01.01-00-0550/15. Celem projektu jest zbudowanie nowego czujnika światłowodowego do pomiaru odkształceń, temperatury i przemieszczeń monitorowanego ośrodka. W dalszej części artykułu przedstawiono wybrane badania laboratoryjne związane z opracowaniem techniki pomiaru odkształceń elementów kompozytowych oraz pilotażową instalację na rzeczywistym obiekcie mostowym, wykonanym z kompozytów FRP.

2. Pomiary rozłożone – podstawy działania i konstrukcja czujnika

Pod pojęciem światłowodu należy rozumieć włókno szklane o specjalnie zaprojektowanej strukturze, wykorzystywane do transmisji fali elektromagnetycznej jako nośnika informacji. Współczesne światłowody są produkowane w procesie wyciągania szklanych pryzm w wysokiej temperaturze, do których wprowadza się odpowiednio dobrane domieszki chemiczne w taki sposób, aby część wewnętrzna (rdzeń) miała nieznacznie różny współczynnik załamania światła od części zewnętrznej (płaszcz). Standardowy światłowod jednomodowy po wyciągnięciu ma średnicę równą 125 μm , przy czym średnica rdzenia to zaledwie 9 μm . W celu zabezpieczenia szklanego, kruchego włókna przed przypadkowymi uszkodzeniami mechanicznymi, bezpośrednio w procesie produkcyjnym nakładana jest warstwa ochronna (najczęściej lakiernicza o średnicy zewnętrznej 250 μm). Przekrój poprzeczny standardowego, jednomodowego włókna telekomunikacyjnego przedstawiono na rys. 1.



Rysunek 1. Przekrój poprzeczny przez standardowe, jednomodowe włókno światłowodowe

Ze względu na różnice we współczynnikach załamania światła materiału rdzenia i płaszczka, wiązka światła może być transmitowana na zasadzie zjawiska całkowitego, wewnętrznego odbicia na granicy tych dwóch ośrodków. W zastosowaniach telekomunikacyjnych dąży się do tego, aby szklane włókno było jak najczystsze, tj. pozbawione imperfekcji, mikrozarysowań, mikrozanieczyszczeń, czy też lokalnych zmian gęstości szkła, które powodują, że wraz z długością światłowodu zmniejsza się moc fali świetlnej. Na skutek ww. zaburzeń w strukturze rdzenia światłowodu, mających miejsce na całej jego długości, dochodzi do powstawania zjawiska rozpraszania światła nazywanego rozpraszaniem Rayleigha. W konsekwencji, odbita od imperfekcji struktury szkła fala świetlna porusza się wstecz względem pierwotnego kierunku ruchu. Amplituda rozproszenia jest przypadkową, ale stałą dla danego włókna własnością. Analiza odbitego promieniowania prowadzona jest obecnie za pomocą zaawansowanych reflektometrów optycznych. Jeśli na skutek odkształceń mechanicznych lub termicznych dojdzie do zmiany długości włókna światłowodowego, zmieniają się również odległości pomiędzy lokalnymi imperfekcjami, co widoczne będzie jako przesunięcie spektrum częstotliwościowego fali wstecznej $\Delta\nu$. Przesunięcie to jest zatem proporcjonalne do liniowej kombinacji zmian temperatury i odkształcenia, i może być analizowane z rozdzielczością przestrzenną sięgającą nawet 5 mm:

$$\frac{-\Delta\nu}{\nu} = K_T \cdot \Delta T + K_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon \quad (1)$$

gdzie: ν - średnia częstotliwość fali [Hz], K_T - współczynnik termiczny [$^{\circ}\text{C}^{-1}$], K_ε - współczynnik odkształceń [-], ΔT - zmiana temperatury [$^{\circ}\text{C}$], $\Delta\varepsilon$ - zmiana odkształceń [$\mu\varepsilon = 1 \times 10^{-6} \Delta L/L$].

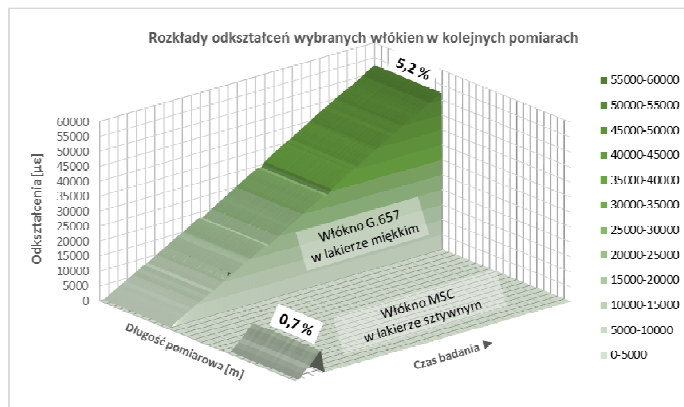
We wszystkich badaniach prezentowanych w dalszej części artykułu, do pomiaru rozkładów odkształceń wzdłuż długości włókien pomiarowych wykorzystano reflektometr optyczny OBR4600 produkcji Luna Technologies (<http://lunainc.com>), którego rozdzielczość pomiaru odkształceń wynosi $\pm 1 \mu\varepsilon$. W badaniach nie stosowano dodatkowych osłon mechanicznych światłowodów w celu zminimalizowania liczby warstw pośredniczących w przekazywaniu odkształceń z elementów konstrukcyjnych na włókno pomiarowe.

3. Wybrane badania laboratoryjne

3.1. Osiowe rozciąganie włókien

Przeprowadzone badanie miało na celu wybór odpowiedniego włókna światłowodowego z punktu widzenia ekonomicznego, technologicznego oraz z uwagi na dokładność i zakres pomiarowy. Podczas badań stosowano referencyjną technikę pomiarową, polegającą na wykorzystaniu mikroskopów optycznych do identyfikacji położenia znaczników na rozciąganych osiowo włóknach oraz śrub mikrometrycznych o dokładności pomiarowej równej $\pm 0,005$ mm. W przeprowadzonych badaniach analizowano standardowe włókno telekomunikacyjne SM 9/125 G.657.A1 w miękkiej powłoce lakierniczej oraz dwa, eksperymentalne włókna wyprodukowane na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie (w powłoce krzemionkowej oraz w powłoce sztywnej). Na rys.2 przedstawiono przykładowe wyniki badań, reprezentujące rozkłady

odkształceń osiowych wzdłuż długości włókien w kolejnych chwilach badania, w których stopniowo zwiększano nacisk włókien aż do ich zerwania.



Rysunek 2. Przykładowy wykres pokazujący różnice w zakresie pomiarowym dla włókien z powłokami o różnych sztywnościach

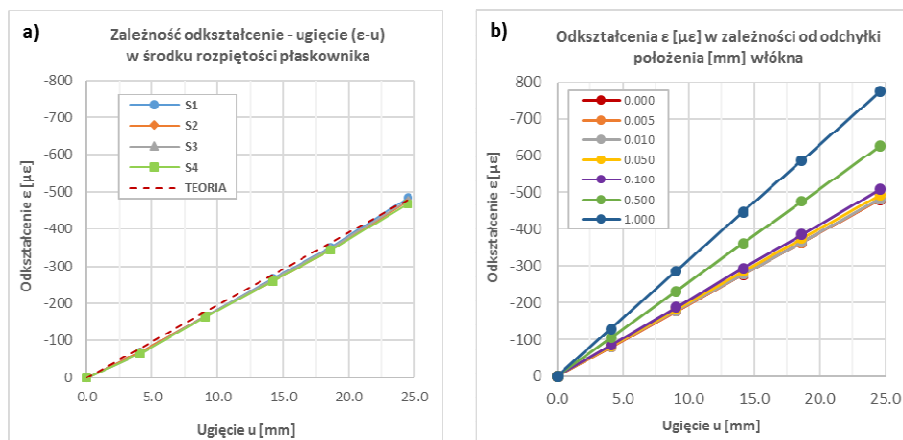
Wnioski z badań pozwoliły na wybranie do pomiarów włókien w miękkim lakierze, które okazały się być optymalne z uwagi na następujące kryteria: średni błąd względem techniki referencyjnej (0,19%), średni współczynnik zmienności rozkładów odkształceń (0,23%), średnie wydłużenie przy zerwaniu (5,25%), a także powszechna dostępność (niski koszt).

3.2. Trójpunktowe zginanie płaskownika kompozytowego

Celem kolejnych badań była weryfikacja skuteczności przenoszenia się odkształceń z elementu kompozytowego na wybrane uprzednio włókna pomiarowe. Przygotowano płaskownik kompozytowy o nominalnych wymiarach przekroju poprzecznego 3,2 x 50 mm i długości 1250 mm, do którego przyklejono wzdłużnie światłowody S1-S4 za pomocą epoksydowego, dwuskładnikowego kleju konstrukcyjnego (po uprzednim odtłuszczeniu powierzchni). Próbkę została poddana przyrostowej deformacji w teście trójpunktowego zginania, przy czym sterowanie eksperymentem odbywało się za pomocą wymuszenia kinematycznego, którego wartość rejestrowana była za pomocą referencyjnej, strunowej techniki pomiarowej. Wykonano szereg badań dla światłowodów przyklejonych zarówno do ściskanej, jak i rozciąganej powierzchni płaskownika, uzyskując rozkłady odkształceń wzdłuż całej jego długości przy zmieniających się wartościach wymuszenia. Uzyskane wyniki porównano z obliczeniami teoretycznymi w zakresie liniowo-sprężystym, do analizy przyjmując wartości odkształceń światłowodu uśrednianych z odcinków o długości 5 mm.

Różnice zmierzonych wartości w stosunku do obliczonych teoretycznie nie przekraczały 3%. Główne źródła błędów to nierównomierna grubość płaskownika oraz wpływ kleju żywicznego na odległość włókna pomiarowego od środka ciężkości badanego przekroju. Przeprowadzono więc analizę, polegającą na uwzględnieniu wpływu ww. odchyłek na mierzone wartości odkształceń. Odchylenie standardowe grubości badanego płaskownika wynosi 0,05 mm. Gdyby wartość tą przyjąć jako odchyłkę położenia włókna względem teoretycznej (nominalnej) powierzchni płaskownika, popełniany błąd wynosiłby ok. 3%. Gdy wartość odchyłki przekracza 0,1 mm, błąd wrasta do 6%. Wnioski te dotyczą

elementu o grubości zaledwie 3,2 mm. W przypadku przekrojów wysokich (kilkaset milimetrów), takich jak przekroje dźwigarów w obiektach mostowych, wpływ odchyłki położenia włókna od teoretycznej krawędzi przekroju poprzecznego na uzyskiwane wyniki pomiarów odkształceń będzie pomijalny.



Rysunek 3. a) Zależność odkształcenie $[\mu\epsilon]$ - ugięcie $[\text{mm}]$ w środku rozpiętości płaskownika: wartości zmierzone przez włókna pomiarowe i obliczone teoretyczne; b) wartości odkształceń w środku rozpiętości płaskownika w zależności od ugięcia $[\text{mm}]$ oraz odchyłki położenia włókna pomiarowego względem teoretycznej krawędzi przekroju $[\text{mm}]$

Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność stosowania dwuskładnikowego kleju konstrukcyjnego do przenoszenia odkształceń z powierzchni materiału kompozytowego na włókno pomiarowe w miękkiej powłoce lakierniczej, dlatego taki sposób instalacji wybrano do badań pełnowymiarowych elementów konstrukcyjnych, opisanych w punkcie 3.3.

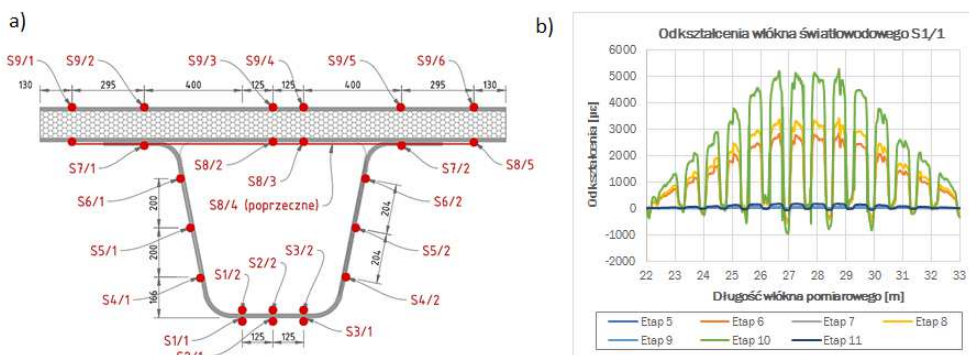
3.3. Czteropunktowe zginanie mostowego dźwigara kompozytowego

Badania przeprowadzono w Wydziałowym Laboratorium Badań Konstrukcji Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej (rys. 6a). Analizowano odkształcenia zmierzone przez włókna światłowodowe przyklejone do powierzchni dźwigara kompozytowego, składającego się z korpusu o kształcie U oraz płyty pomostu (rys.5a). Badany dźwigar był pełnowymiarowym modelem układu nośnego dźwigar - płyta, zastosowanego w pierwszym krajowym w pełni kompozytowym moście drogowym, zbudowanym k. Rzeszowa [2]. Światłowody zostały przyklejone według ściśle zaprojektowanych tras pomiarowych, a eksperyment odbywał się w cyklach obciążanie/odciążanie ze zwiększającą się wartością siły, aż do zniszczenia układu dźwigar – płyta. Obciążenie przekazywane było na konstrukcję poprzez dwie stalowe belki poprzeczne rozstawione w odległości 2,4 m. Badanie zrealizowano w warunkach stałej temperatury, stąd nie kompensowano termicznie uzyskiwanych wyników odkształceń.



Rysunek 4. Trasy włókien pomiarowych (S1/1, S1/2, S1/3) w widoku z dołu pasa dolnego dźwigara

Rożmieszczenie włókien pomiarowych w przekroju poprzecznym zaprezentowano na rys. 5a. Przykładowy wykres rozkładów odkształceń w kolejnych etapach badania przedstawia rys. 5b dla światłowodu S1/1, który został przyklejony do dolnej powierzchni pasa dolnego dźwigara. Trasy włókien pomiarowych zostały ukształtowane w taki sposób, by możliwa była analiza trajektorii odkształceń w powłoce dźwigara. Pomiar odkształceń z rozdzielczością przestrzenną rzędu 5 mm wzdłuż wielu linii pomiarowych na długości rzeczywistego elementu jest zadaniem niemożliwym do zrealizowania w przypadku stosowania tradycyjnych technik pomiarowych.



Rysunek 5. a) Przekrój poprzeczny elementu zespolonego dźwigar- płyta z lokalizacją i numeracją światłowodów pomiarowych; b) przykładowy wykres rozkładów odkształceń w kolejnych etapach badania dla włókna S1/1

Przeprowadzone badane potwierdziło skuteczność proponowanych rozwiązań do pomiaru odkształceń mostowych elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów kompozytowych FRP, w zakresie odkształceń rozciągających przekraczających ponad 0,5% (5000 µε).

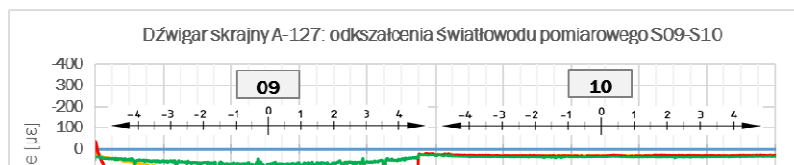


Rysunek 6. a) Widok stanowiska badawczego w Laboratorium Politechniki Rzeszowskiej; b) widok badanego mostu kompozytowego w czasie obciążenia próbnego

4. Obciążenie próbne mostu kompozytowego

Rezultaty badań laboratoryjnych nad wykorzystaniem światłowodów do pomiarów odkształceń elementów kompozytowych zweryfikowano w warunkach rzeczywistych, w czasie obciążenia próbnego mostu w Nowej Wsi k. Rzeszowa [12]. Pierwsze obciążenie zrealizowano w dniu 30.11.2016 r. (rys. 6b), a badania powtórzono w dniu 19.07.2017 r. Ponieważ wpływ zmian temperatury na odkształcenia elementów konstrukcyjnych mostu jest

bardzo istotny, poza światłowodami przyklejonymi bezpośrednio do powierzchni kompozytów, zainstalowano także włókno umieszczone swobodnie w poliamidowej tubie przytwierdzonej do dźwigara wzdłuż całej długości mostu. Przykładowe wyniki pomiarów odkształceń dla włókna kompensacyjnego S10 oraz włókna S09 przyklejonego wzdłuż dolnej powierzchni dolnej pęki dźwigara w kolejnych etapach obciążenia próbnego przedstawiono na rys. 7.



Rysunek 7. Wykres odkształceń [$\mu\epsilon$] zmierzonych przez światłowód zainstalowany na dolnej powierzchni dźwigara (S09) oraz światłowód kompensacyjny (S10) w kolejnych etapach obciążenia próbnego z dnia 19.07.2017 r.

Otrzymane rezultaty weryfikowane były za pomocą referencyjnych technik pomiarowych – m.in. techniką strunową, uzyskując bardzo dobrą zgodność. System monitorowania mostu w oparciu o czujniki strunowe realizuje obecnie punktowe pomiary odkształceń elementów konstrukcyjnych oraz przemieszczeń łożysk z częstotliwością równą 15 min, natomiast rozłożone pomiary światłowodowe wykonywane są kilka razy do roku z uwagi na brak możliwości pozostawienia w sąsiedztwie mostu reflektometru optycznego.

5. Podsumowanie

Skuteczność przedstawionego sposobu pomiaru odkształceń elementów kompozytowych za pomocą pojedynczego światłowodu telekomunikacyjnego została potwierdzona w licznych badaniach laboratoryjnych, uwzględniających również elementy wykonane w skali naturalnej, oraz w warunkach rzeczywistej pracy obiektu mostowego. Zastosowanie włókien szklanych przyklejanych za pomocą żywicznego środka adhezyjnego do kompozytu FRP jest korzystne ze względu na zbliżone parametry fizykomechaniczne stosowanych materiałów. Ponadto, możliwość identyfikacji lokalnych uszkodzeń oraz kompensacji termicznej uzyskiwanych wyników, czyni zaproponowane rozwiązanie skutecznym i kompleksowym narzędziem do analizy stanu technicznego obiektów mostowych. Stąd, doskonalenie możliwości światłowodowej techniki pomiarów rozłożonych odkształceń i temperatury jest obecnie przedmiotem licznych badań naukowych [13, 14].

Literatura

- [1] SIWOWSKI T., RAJCHEL M., KALETA D., WŁASAK L. Pierwszy w Polsce most drogowy z kompozytów FRP. *Inżynieria i Budownictwo* 10/2016.
- [2] SIWOWSKI T., KULPA M., RAJCHEL M., KALETA D. Nowy most drogowy z kompozytów FRP. *Mosty* 3-4/2017.

- [3] XU Y. L., XIA Y., Structural Health Monitoring of Long-Span Suspension Bridges. Spon Press, London and New York, 2012.
- [4] WENTZEL H., Health Monitoring of Bridges. John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] GLIŠIĆ B., INAUDI D., Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring, Wiley, 2007.
- [10] KUSZNIER J., Światłowody w zastosowaniach czujnikowych, Politechnika Białostocka, Białystok 2016.
- [11] SAMIEC D.: Distributed fibre-optic temperature and strain measurement with extremely high spatial resolution. Photonic International, 2012.
- [12] SIWOWSKI T., SIENKO R., BEDNARSKI Ł., System monitorowania mostów kompozytowych z wykorzystaniem czujników światłowodowych. Mosty 5/2017.
- [13] BARRIAS A., CASAS J. R., VILLALBA S., A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications, Sensors 2016, 16.
- [14] SIENKO R., HOWIACKI T., SZYDŁOWSKI R., MAŚLAK M., PAZDANOWSKI M., Application of distributed optical fiber sensor technology for strain measurements in concrete structures. COST TU1402: Quantifying the Value of Structural Health Monitoring, Copenhagen, 24th August 2016.

OPTICAL FIBER STRAIN MEASUREMENTS OF COMPOSITE BRIDGE MEMBERS BASED ON SELECTED TESTS

Summary

Nowadays, designers and engineers are searching for effective ways to construct structures. That is why composite materials are increasingly used in civil engineering applications, mainly because of its light weight as well as high strength and durability. On the other hand, operation of composite members and structures in *in situ* conditions has not yet been sufficiently investigated. This is the reason for structural health monitoring, especially with advanced measurement solutions, which will give us as comprehensive look at this issue as possible. The article presents selected results of researches, which were carried out using innovative optical fiber distributed strain measurement technology, based on Rayleigh scattering. The laboratory tests were done, as well as application on real composite bridge structure under its load test.