

ŚWIATŁOWODY W MONITOROWANIU KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH

OPTICAL FIBERS IN THE MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES

Tomasz Howiacki

Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Lądowej
Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
e-mail: howiacki.tomasz@gmail.com

Abstract: The majority of structural health monitoring systems is created using spot measurements, aided with a numerical model. However, in the near future fiber optic measurement technique has a chance to introduce a new quality to the field of knowledge covering structural monitoring of buildings. It allows for measuring selected physical quantities (e.g. strain or temperature) continuously over its entire length. For example, attaching the optical fiber along concrete, load-carrying beam, it is possible to obtain information about the time and place (the reason) of occurring cracks and about the width of its opening. Implementation of optical fibers for general applications in the construction industry, however, still requires much researches and testing. This paper presents an overview of current projects and studies related to the applications of optical fibers in structural health monitoring of engineering structures, as well as an overview of selected studies carried out in this field at the Institute of Building Materials and Structures (Cracow University of Technology).

Key words: monitoring systems construction, optical fibers.

Wprowadzenie

Systemy monitorowania (ang. Structural Health Monitoring SHM) miały swój początek w przemyśle kosmicznym i lotniczym, gdzie ze względu na dużą odpowiedzialność i realizacje niespotykanych dotychczas projektów, wiedza na temat rzeczywistej pracy maszyny była dla inżynierów niezwykle cenna. Miało to szczególne znaczenie w momencie rozpoczęcia masowej produkcji, pozwalało bowiem na wykrycie ewentualnych nieprawidłowości i rozwiązywanie zadań optymalizacji. W efekcie akceptowalne ryzyko awarii w przemyśle lotniczym jest obecnie znacznie wyższe niż w budownictwie [10]. Zastosowanie systemów SHM w inżynierii lądowej to pomysł stosunkowo młody: na świecie rozwijany od kilkudziesięciu, a w Polsce dopiero od kilkunastu lat. Obserwowanie pracy rzeczywistych konstrukcji budowlanych i wnioskowanie na tej podstawie jest jednak znacznie trudniejsze od monitorowania obiektów w innych gałęziach przemysłu, np. dobrze zdefiniowanych układów mechanicznych [5]. Wynika to między innymi z licznych imperfekcji materiałowych i geometrycznych, współpracy budynku z niejednorodnym podłożem, którego parametry nie są możliwe do jednoznacznego określenia i zmieniają się w czasie, wpływu warunków atmosferycznych, rzeczywistych warunków podparcia itp. Dlatego zasadnym jest instalowanie na elementach konstrukcyjnych urządzeń,

które umożliwią pomiar wybranych wielkości fizycznych istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy obiektu w całym okresie jego eksploatacji [2, 3]. Projektowanie systemów monitorowania oraz interpretowanie uzyskanych wyników wymaga często interdyscyplinarnej współpracy i zawsze umiejętności selekcjonowania i zarządzania danymi.

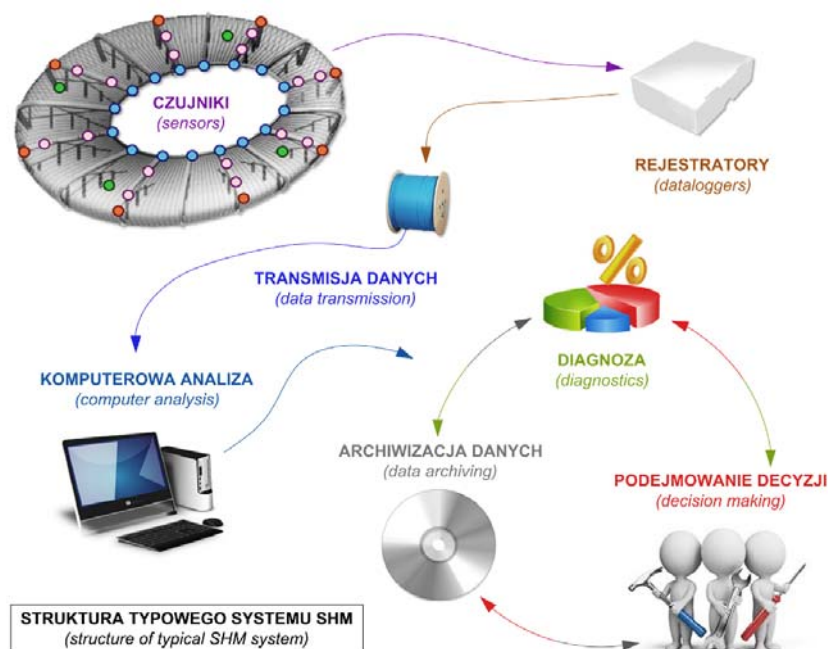
Wciąż trwają poszukiwania rozwiązań, które umożliwią w przyszłości pozyskiwanie pełniejszych informacji na temat pracy konstrukcji. Dzięki temu możliwe będzie bardziej efektywne realizowanie podstawowych celów i wymogów stawianych współcześnie systemom SHM. Najważniejsze wypunktowano poniżej [10]:

- obserwowanie zachowania się konstrukcji w obliczu zmieniających się oddziaływań eksploatacyjnych, środowiskowych i innych;
- weryfikowanie modelu obliczeniowego konstrukcji zbudowanego na etapie projektowania (możliwość dostrojenia modelu, zaktualizowanie procedur obliczeniowych);
- identyfikowanie miejsc i skali potencjalnych uszkodzeń (poprawa bezpieczeństwa);
- wspomaganie okresowych inspekcji i przeglądów stanu technicznego konstrukcji;
- efektywne zarządzanie obiektem np. poprzez możliwość zaplanowania remontów.

Na rys. 1 przedstawiono strukturę typowego systemu monitorowania konstrukcji. Choć współcześnie proces

gromadzenia danych i informowania o zagrożeniach jest zazwyczaj zautomatyzowany, należy podkreślić, że ostateczna decyzja o ocenie stanu technicznego obiektu i

podjęciu ewentualnych działań, zawsze należy do inżyniera.

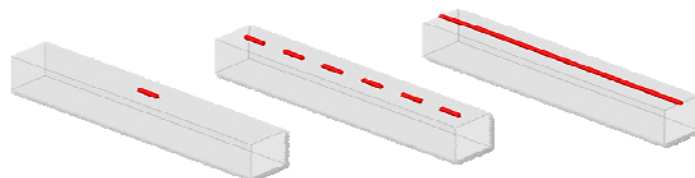


Rys. 1. Struktura typowego systemu monitorowania konstrukcji [opracowanie własne].

Pomiary punktowe i ciągłe

Jedno z podstawowych założeń w projektowaniu systemów monitorowania związane jest z zapewnieniem bezpieczeństwa obiektu poprzez wczesne informowanie o miejscach i skali potencjalnych uszkodzeń. Dotychczas założenie to pozostawało niestety raczej w sferze teoretycznych życzeń, aniżeli praktycznych możliwości. Działo się tak przede wszystkim dlatego, że ogromna większość systemów realizowanych w Polsce i na świecie, pozyskuje dane w oparciu o pomiary punktowe. Do tego celu stosuje się czujniki, które wykorzystują w swoim działaniu różne zjawiska fizyczne. W budowie długoterminowych systemów monitorowania, ze

względem na wiele zalet, powszechne zastosowanie znalazły między innymi czujniki strunowe [1]. Wykrywanie lokalizacji uszkodzeń, np. rys w konstrukcjach żelbetowych, na podstawie pomiarów zrealizowanych w kilku punktach na obiekcie, nie jest możliwe. Nawet w przypadku, gdy analiza odbywa się z wykorzystaniem zaawansowanych modeli numerycznych. Znacznie więcej informacji uzyskalibyśmy z pomiarów quasi-ciągłych, które można zrealizować np. poprzez zainstalowanie kilku czujników w jednej linii pomiarowej, co schematycznie przedstawiono na rys. 2. Takie podejście nie jest jednak ekonomiczne, a przez to w wielu przypadkach niemożliwe do zastosowania.



Rys. 2. Schemat pomiaru odkształceń belki – od lewej: punktowego, quasi-ciągłego, ciągłego (rozłożonego).

Zupełnie nowe możliwości niesie ze sobą światłowodowa technika pomiarowa, która może stać się przełomem w monitorowaniu konstrukcji inżynierskich. Dzięki wykorzystaniu różnych zjawisk optycznych możliwe jest realizowanie pomiarów quasi-ciągłych wzdłuż długości jednego światłowodu. W tym celu stosuje się między innymi siatki Bragg'a lub interferometrię Fabry-Perot'a [9]. Jednak, co najbardziej obiecujące, światłowody umożliwiają, dzięki wykorzystaniu zjawiska rozpraszania światła (np. rozpraszanie Rayleigh'a, Brillouin'a lub Raman'a), wykonywanie pomiarów z rozdzielczością tak małą, że z punktu widzenia monitorowania konstrukcji inżynierskich można je uznać za pomiar ciągły, nazywany także rozłożonym. Przykładowo, jednoczesny pomiar dystrybucji odkształceń i temperatury wzdłuż długości elementu konstrukcyjnego umożliwiłby znacznie pełniejszą ocenę pracy tego elementu, a przede wszystkim pozwoliłby na zlokalizowanie potencjalnych miejsc, które będą inicjatorami powstania rys przy większym obciążeniu eksploatacyjnym.

Zastosowanie nowej technologii stwarza niespotykane dotąd możliwości analizy rzeczywistej pracy konstrukcji, jednak w dalszym ciągu pozostaje do rozwiązania wiele problemów technicznych. Konieczne będzie wykonanie pilotażowych badań laboratoryjnych i realizacji in situ, zanim światłowody wejdą do powszechnego stosowania w budownictwie. W dalszej części artykułu

przedstawiono przykładowe badania wykonane w Instytucie Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej we współpracy z firmą SHM System realizującą projekt badawczy pt. „Opracowanie nowego czujnika światłowodowego umożliwiającego wyznaczanie profili pionowych i poziomych przemieszczeń badanych obiektów na odcinkach o długości do 120 km.” Projekt ten wykonywany jest w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020.

Przykłady badań laboratoryjnych

We wszystkich prezentowanych badaniach do odczytania rozkładu odkształceń wzdłuż długości światłowodu wykorzystano, dzięki uprzejmości firmy INTERLAB, reflektometr optyczny OBR4600 produkcji Luna Technologies (rys. 3). Reflektometr ten umożliwił wykonywanie pomiarów rozłożonych z rozdzielczością równą $\pm 1 \mu\epsilon$, dzięki wykorzystaniu zjawiska rozpraszania Rayleigh'a. Takie podejście, przy zastosowaniu światłowodów o długości do 70 m i rozdzielczości przestrzennej sięgającej rzędu kilku milimetrów, pozwala zastąpić tysiące pojedynczych, tradycyjnych czujników odkształceń [8].



Rys. 3. Reflektometr optyczny OBR4600 produkcji Luna Technologies.

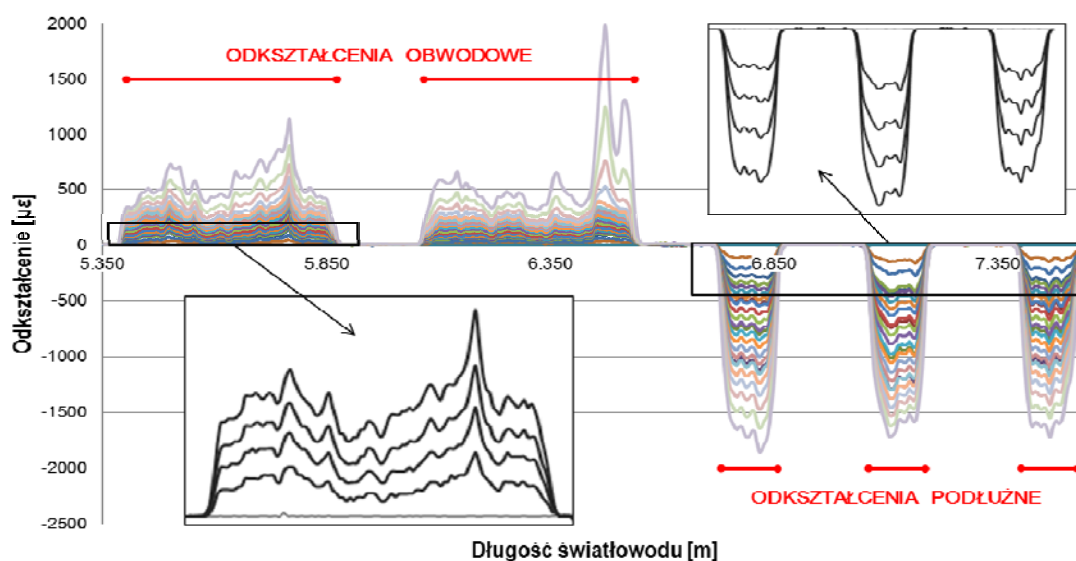
W pierwszym prezentowanym badaniu na maszynie wytrzymałościowej poddano ścisłaniu normową, betonową próbkę walcową o wysokości 300 mm i średnicy podstawy 150 mm. Na wybranych odcinkach przymocowano światłowód poprzez przyklejenie. Wykonano łącznie 5 odcinków pomiarowych: trzy podłużne o długości ok. 130 mm, rozłożone symetrycznie po obwodzie co 120° , oraz dwa obwodowe (o długości równej ok. $2\pi=470$ mm) w rozstawie równym długości odcinka podłużnego. Dodatkowo, w celu kontroli i weryfikacji uzyskanych wyników, w trakcie badania realizowano pomiary odkształceń podłużnych za pomocą trzech ekstensometrów. Badanie wykonywano dwuetapowo. W pierwszym etapie poddano próbkę obciążeniu do wartości naprężeń ściskających równej ok. 40 MPa, a następnie stopniowo odciążono do wartości 2 MPa. W drugim etapie poddano próbkę ścisłaniu aż do zniszczenia, uprzednio usuwając zainstalowane eksten-

sometry. Przeprowadzone badanie miało na celu ocenę możliwości wykorzystania techniki światłowodowej do m.in. określania parametrów mechanicznych betonu takich jak wytrzymałość czy moduł sprężystości, obserwacji i analizy dystrybucji odkształceń podłużnych i poprzecznych, a także do identyfikowania lokalizacji potencjalnych miejsc uszkodzeń betonu (zarysowania). Ostatni punkt jest szczególnie istotny w kontekście wykorzystania światłowodów w zaawansowanych systemach monitorowania konstrukcji, ponieważ stwarza realne możliwości istotnej poprawy bezpieczeństwa obiektów inżynierskich. Przed rozpoczęciem badania wykonano tzw. pomiar zerowy, do którego odnoszone są wszystkie kolejne wyniki pomiarów. Teoretycznie mówimy zatem w takim przypadku o przyrostach odkształceń, a nie o ich wartościach bezwzględnych. Jednak zakładając, że przy braku obciążenia (przed ściśnięciem próbki) wartości odkształceń są zerowe, to

uzyskane przyrosty odpowiadają wartościom bezwzględ-
nym.

Analizując informacje uzyskane z pomiarów światłowodowych rozpatrujemy je w dwóch dziedzinach: czasu oraz odległości od początku światłowodu. W tradycyjnych pomiarach punktowych analiza upraszcza się wyłącznie do funkcji czasu. Na rys. 4 przedstawiono rozkłady odkształceń zarejestrowane wzdłuż długości pojedynczego światłowodu w kolejnych chwilach czasowych. Wyraźnie obserwować można odcinki pomiarowe, tzn. przyklejone do próbki betonu sekcje światłowodu. W odcinkach obwodowych mamy do

czynienia z odkształceniami rozciągającymi, natomiast w podłużnych – ściskającymi. Warto zwrócić uwagę, że dystrybucja odkształceń na poszczególnych odcinkach zachowuje swój kształt od samego początku badania poprzez wszystkie kolejne chwile pomiaru. Istnieje zatem możliwość zidentyfikowania miejsc najsłabszych, którym odpowiadają wartości ekstremalne na wykresie, już we wczesnej fazie obciążenia betonu, tzn. jeszcze wtedy, gdy beton nie jest zarysowany lub gdy mikro-zarysowania niewidoczne gołym okiem nie mają istotnego wpływu na pracę konstrukcji.



Rys. 4. Wykres dystrybucji odkształceń na pięciu odcinkach pomiarowych wzdłuż długości pojedynczego światłowodu [opracowanie własne].

W przypadku odcinków podłużnych, na których występują naprężenia ściskające, uzyskane wykresy są znacznie bardziej gładkie (mniejsze ekstrema), niż w przypadku odkształceń obwodowych, gdzie występują naprężenia rozciągające i dochodzi do zarysowania próbki. Uzyskane z pomiarów dane odpowiadają zatem w pełni przewidywaniom. Warto jednak zwrócić uwagę, że w przypadku teoretycznych obliczeń klasycznych lub numerycznych, przyjmując założenie o jednorodności betonu i jego pracy w zakresie liniowo-sprężystym, wykresy te powinny być funkcją stałą. Obserwacja ta potwierdza, że nawet w przypadku tak prostych badań rzeczywistość jest o wiele bardziej złożona od jej modelu. Jednak dzięki pomiarom ciągłym (rozłożonym) jesteśmy w stanie poznać ją w sposób znacznie bardziej kompleksowy, niż było to możliwe dotychczas.

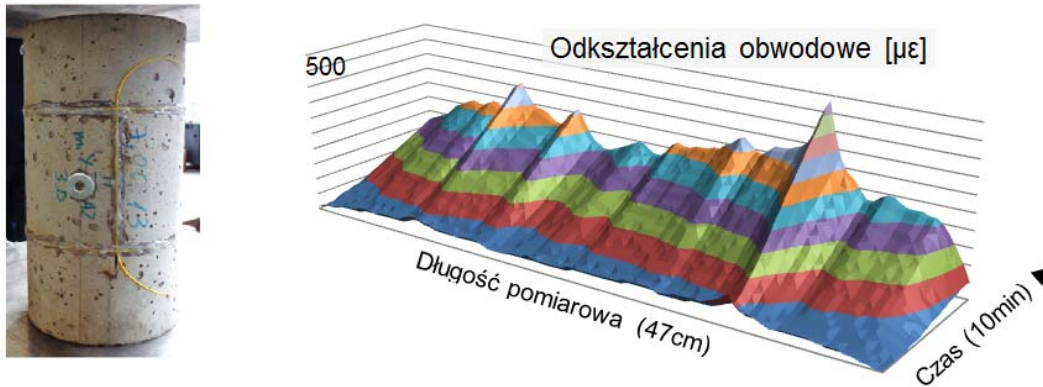
Ponieważ zmierzone wartości odkształceń są funkcją dwóch zmiennych, wygodnie będzie przedstawić je na wykresach przestrzennych, w których na osiach poziomych zaznaczono dziedziny czasu i długości. Na rys. 5 zaprezentowano przykładowy wykres dla od-

kształceń obwodowych w okresie obciążania oraz fotografię opomiarowanej próbki tuż przed badaniem.

Innym przykładem badań o charakterze pilotażowym są badania pionowania ściany murowej. Przedmiotowa ściana została wymurowana na kształt fragmentu rzeczywistej ściany o dużym znaczeniu historycznym. Wiernie odwzorowano nierówności powierzchni, ubytki i inne imperfekcje geometryczne, które obserwować można na istniejącej konstrukcji. Celem przeprowadzonych badań było określenie odpowiedzi ściany murowej (przemieszczenia, odkształcenia, kąty obrotu, zarysowania, pęknięcia itp.) na próbę jej pionowania przy pomocy sił przekazywanych na powierzchnię punktowo w sześciu miejscach. Miało to na celu zweryfikowanie skuteczności takiego sposobu zmiany jej geometrii w kontekście ewentualnego zastosowania na rzeczywistym obiekcie. Stanowisko badawcze wyposażone zostało w układ sześciu siłowników mocowanych do płaskowników ze stali konstrukcyjnej S355 o grubości 20 mm. Do każdego płaskownika przyklejono po obu jego stronach elektrooporowe oraz strunowe czujniki odkształceń, które umożliwiły wyka-

librowanie siłomierzy w zakresie od 0 do 5 kN. Wraz z przykładaną do ściany siłą, jako odpowiedź mierzone były przemieszczenia w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ściany w kilkunastu punktach pomiarowych.

Siły przykładano do ściany stopniowo i w taki sposób, aby zachować symetrię przemieszczeń poziomych. Przed docelowym badaniem, wykonano kilka prób obciążania ściany w mniejszym zakresie przemieszczeń.



Rys. 5. Widok próbki oraz przykładowy wykres odkształceń obwodowych w dziedzinie czasu i długości.

Opisane badania uzupełniono także o pomiary odkształceń zrealizowane przy wykorzystaniu światłowodów. Pomiary te miały umożliwić obserwację dystrybucji odkształceń wzdłuż wysokości ściany w kilku punktach pomiarowych i ułatwić interpretację zachowania się konstrukcji (np. określić, czy pracuje ona bardziej jako bryła sztywna, czy też rozkład odkształceń jest równomierny po jej wysokości). Punkt pomiarowy zrealizowano przyklejając światłowod do powierzchni ściany murowej, a ściślej do powierzchni cegieł przy pomocy żywicy epoksydowej. Swobodne odcinki światłowodu znajdowały się zatem w strefach połączenia cegieł z zaprawą, średnio na długości ok. 4 cm, gdyż w tych miejscach spodziewano się zarejestrowania największych odkształceń. Strefy klejenia wyznaczono uprzednio za pomocą taśmy. Widok przykładowego punktu pomiarowego przedstawiono na rys. 6. W tym przypadku możemy zatem mówić o pomiarach quasi-ciągłych, ale z rozdzielczością przestrzenną dostosowaną do specyfiki zagadnienia.

Jeden światłowod posłużył do rejestracji odkształceń wzdłuż wysokości ściany w dwóch pionowych, równoległych do siebie odcinkach. Odczytywanie światłowodu odbywało się od dołu ściany ku jej górze, a potem z powrotem. Rejestrowano odkształcenia wzdłuż całej długości światłowodu pomiarowego. Aby wyznaczyć rzeczywiste odcinki pomiarowe, tzn. fragmenty światłowodu przymocowane do powierzchni ściany,

wykonano pomiary kontrolne, uciskając światłowod na początku i na końcu wybranego odcinka. Odczytane w ten sposób ekstremalne wartości odkształceń umożliwiły identyfikację rozpatrywanego zakresu, a tym samym dostosowanie okna wizualizacji wyników, jeszcze przed rozpoczęciem badania, do tego zakresu.

Przykładowy wykres dystrybucji odkształceń dla światłowodu zlokalizowanego na rozciąganej powierzchni ściany murowej zaprezentowano na rys. 6. Łącznie wykonano cztery punkty pomiarowe. Uzyskane wyniki wskazują, że konstrukcja ściany pracowała przede wszystkim w jej dolnych strefach (do wysokości ok. 0,50 m), natomiast w pozostałej części zachowywała się jak bryła sztywna. Praca taka wyraźnie uwidoczniła się w początkowych etapach badania. W końcowej fazie obciążania konstrukcji zaobserwowano wystąpienie znacznych wartości ekstremalnych odkształceń, przesuniętych względem początkowo obserwowanych miejsc. Mogą być one skutkiem odspojenia się rdzenia światłowodu od powłoki ochronnej, co uniemożliwia poprawną ocenę zapisanych w tych etapach danych.

Zrealizowane pomiary potwierdziły konieczność i zasadność prowadzenia dalszych prac oraz wskazały potencjalne kierunki badań naukowych, związanych m.in. z określeniem rzeczywistych zakresów pomiarowych, czy też budową czujników światłowodowych o parametrach adekwatnych do analizowanych zagadnień.



Rys. 6. Widok stanowiska badawczego oraz przykładowy wykres dystrybucji odkształceń w początkowej fazie przyładania obciążenia na ścianę murową.

Podsumowanie

Ze względu na potwierdzone w wielu badaniach [4, 7, 11] zalety i możliwości światłowodowej techniki pomiarowej, ma ona duże szanse na powszechne zastosowanie w zagadnieniach inżynierii lądowej. Przed inżynierami i naukowcami wciąż pozostaje jednak do rozwiązania wiele problemów technicznych, dlatego prace nad udoskonaleniem nowej technologii i opracowaniem skutecznych rozwiązań praktycznych trwają obecnie w wielu jednostkach naukowych, ale także prywatnych, proinnowacyjnych przedsiębiorstwach w Polsce i na świecie. Z punktu widzenia budowy automatycznych, długoterminowych systemów monitorowania, najbardziej ciekawe i pożądane, zdaniem autora, wydaje się być przeanalizowanie następujących zagadnień:

- określenie dokładności względem innych, powszechnie stosowanych technik pomiarowych (np. czujniki strunowe, elektrooporowe, mechaniczne);
- określenie użytecznego zakresu pomiarowego, zarówno po stronie ściskanej, jak i rozciąganej – warunkowanej przede wszystkim możliwością odspojenia rdzenia światłowodowego od warstw ochronnych;
- kompensowanie wyników ze względu na działanie czynników zewnętrznych, np. temperatury;

- dalsze prace nad lokalizowaniem miejsc uszkodzeń konstrukcji oraz opracowanie algorytmów obliczeniowych służących ocenie ilościowej tych uszkodzeń (np. określenie szerokości rozwarcia rysy);
- sposoby montażu światłowodów w zależności od typu konstrukcji i/lub materiału konstrukcyjnego (elementy stalowe, żelbetowe, sprężone, drewniane, kompozytowe itd.);
- oszacowanie, w zależności od sposobu montażu na konstrukcji, długości „transmisji”, tzn. odległości, na której odkształcenia z elementu przekazywane są w pełni na rdzeń światłowodu;
- analiza relacji odkształceń podłużnych i poprzecznych elementu konstrukcyjnego,
- opracowanie urządzenia umożliwiającego wykonywanie za pomocą światłowodów pomiarów w sposób zdalny i automatyczny;
- opracowanie rozwiązań technicznych, dzięki którym możliwe będzie jednoczesne odczytywanie wielu światłowodów.

Potencjalne korzyści wynikające z zastosowania światłowodowej techniki pomiarowej w monitorowaniu konstrukcji budowlanych są bardzo duże, dlatego warto podjąć wysiłek naukowy i techniczny w celu rozwiązania pojawiających się problemów i lepszego rozpoznania zachodzących zjawisk.

Literatura

1. Bednarski, Ł., Sieńko, R., Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi, *Inżynieria i Budownictwo*, 2013, 11, s. 615-619.
2. Bednarski, Ł., Sieńko, R., Howiacki, T., Analysis of rheological phenomena in reinforced concrete cross-section of Rędziński bridge pylon based on in situ measurements, *Procedia Engineering*, 2015, 108, pp. 536-543.
3. Bednarski, Ł., Sieńko, R., Howiacki, T., Wybrane zagadnienia monitorowania konstrukcji. XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 2015.

4. Delepine-Lesoille, S., Merliot, E., Boulay, C., Quetel, L., Delaveau, M., Courteville, A., Quasi-distributed optical fibre extensometers for continuous embedding into concrete: design and realization, *Smart Materials and Structures*, 2006, 15, pp. 931-938.
5. Furtner, P., Wenzel, H., Structural Health Monitoring at the Civil Infrastructure: Recent progress & Future Demands, 4th International Conference on SHM of Intelligent Structure, Zurich, 2009.
6. Howiacki, T., Automatyczne systemy monitorowania konstrukcji – bezpieczeństwo, diagnostyka, nauka. Praca zbiorowa pod redakcją: T. Trapko, M. Musiała, W. Pawlaka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2015.
7. López-Higuera, J., Cobo, L., Incera, A., Cobo, A., Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring, *Journal of Lightwave Technology*, 2011, Vol. 29, no. 4, pp. 587 – 608.
8. Samiec, D., Distributed fibre-optic temperature and strain measurement with extremely high spatial resolution. *Photonic International*, 2012, 6, pp. 10-13.
9. Skłodowski, M., Współczesny monitoring obiektów budowlanych, *Przegląd Budowlany*, 2009, 3, s. 37-46.
10. Xu, Y.L., Xia, Y., Structural Health Monitoring of Long-Span Suspension Bridges. Spon Press. London and New York, 2012.
11. Zhou, Z., Wang, B., Ou, J., Local Damage Detection of RC Structures With Distributive FRP-OFBG Sensors. Second International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures. Winnipeg, Canada, 2004.