

BUILDER
FOR THE
FUTURE

BUILDER
FOR THE
YOUNG
ENGINEERS

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.

Tomasz Howiacki
Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Krakowska
howiacki.tomasz@gmail.com

OPIEKUN NAUKOWY
dr inż. Rafał Sieńko
Instytut Materiałów i Konstrukcji
Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Krakowska

Rola badań doświadczalnych w rozwoju nauki i techniki jest ogromna. Doświadczenie jest szczególnie ważne w naukach inżynierskich, w których istotną rolę odgrywa bardzo wiele trudnych do jednoznacznego opisanego czynników. W przypadku analizie konstrukcji budowlanych uwzględnić należy m.in. niejednorodności i imperfekcje materiałowe, tolerancje wykonania, wpływ czasu i zmęczenia, niejednorodne warunki gruntowo-wodne, losowość oddziaływań o różnym charakterze, czynnik ludzki i wiele innych.

W artykule opisano przykłady badań laboratoryjnych, których celem było opracowanie nowej technologii pomiarowej w oparciu o czujniki światłowodowe, mające szansę w niedalekiej przyszłości zrewolucjonizować podejście w monitorowaniu pracy konstrukcji. Wybrano przykłady badań prowadzonych w różnych jednostkach naukowych na świecie, ale także w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej.

Podstawowa przewaga czujników światłowodowych nad niemalże wszystkimi innymi stosowanymi powszechnie rozwiązaniami pomiarowymi polega na możliwości wykonywania odczytów w sposób geometrycznie ciągły [2] (z inżynierskiego punktu widzenia) wzdłuż długości pojedynczego włókna, a zatem także wzdłuż długości elementu konstrukcyjnego, do którego włókno zostało przytwierdzone. Takie podejście umożliwia zastąpienie dziesiątek tradycyjnych, punktowych czujników pojedynczym włóknom światłowodowym [3, 4].

ŚWIATŁOWODY W POMIARACH INŻYNIERSKICH

Analiza teoretyczna, ze względu na konieczność przyjęcia wielu założeń upraszczających, powinna być zweryfikowana doświadczalnie. Dlatego poszukuje się coraz skuteczniejszych narzędzi umożliwiających analizę pracy konstrukcji w rzeczywistych warunkach środowiskowych.

Przykłady badań laboratoryjnych ze światła

Prowadzone badania w zakresie wykorzystania światłowodów w pomiarach inżynierskich koncentrują swoją uwagę na takich aspektach, jak zapewnienie odpowiedniej przyczepności do wiarygodnego przeniesienia odkształceń z elementu konstrukcyjnego na włókno pomiarowe, możliwości identyfikowania uszkodzeń konstrukcji (np. zarysowań), kompensacji termicznej uzyskiwanych wyników, zabezpieczenia mechanicznego czujników i wielu innych. W pracy [5] opisano propozycję inteligentnego czujnika, zwanego również prętem FRP-OFBG, wykorzystującego zalety kompozytów oraz światłowodów z siatką Bragg'a. Czujniki zatopiono w 12 żelbetowych belkach, obciążanych w teście czteropunktowego zginania. Zaproponowano zwiększenie przyczepności pręta pomiarowego do betonu poprzez dodanie ziaren piasku lub spiralnego oplotu na uprzednio zatopiony w żywicy pręt. Pomiaru weryfikowane były referencyjnymi ekstensometrami mocowanymi na powierzchni belek. Skorelowanie wyników z obu rodzajów czujników umożliwiło określenie miejsca i czasu powstania rysy, a także pozwoliło na podstawowe oszacowanie ilościowe.

W pracy [6] przedstawiono projekt oraz wykonanie czujnika światłowodowego realizującego pomiaru ciągłe odkształceń wewnątrz betonu. Zaproponowano kompozytową osłonę światłowodu wyprofilowaną na kształt fali, aby zapewnić skuteczne zespolenie czujnika z otaczającym go betonem. Sztywność obu-

dowy światłowodu została dobrana w taki sposób, aby była zbliżona do sztywności betonu, dzięki czemu zminimalizowano powstawanie lokalnych koncentracji naprężeń – co potwierdziły również symulacje numeryczne. Ponadto odpowiednie ukształtowanie osłony rdzenia światłowodowego umożliwiło wykonywanie symetrycznych pomiarów zarówno po stronie rozciągania, jak i ściskania. Pierwsze praktyczne zastosowanie zrealizowano w 2005 roku, instalując światłowody wewnątrz filarów mostu.

W ramach innych badań [7] wykonano belkę żelbetową wyposażoną w czujniki światłowodowe. Belka obciążana była stopniowo w czteropunktowym teście zginania. Dystrybucja odkształceń odpowiadała spodziewanemu trapezowemu przebiegowi momentów zginających zarówno na dolnej, jak i na górnej powierzchni. W kolejnych krokach obserwowano wyraźne rozwój odkształceń oraz momenty i miejsca powstania zarysowania. Ekstremalna wartość odkształceń po stronie rozciąganej, mniej więcej na środku rozpiętości belki, odpowiadała powstaniu pierwszej rysy, o największej szerokości rozwarcia.

Specyficzny kształt wykresu w miejscu powstania rysy związany jest z mechaniczną odpowiedzialnością układu włókno – klej podczas przenoszenia „otwarcia rysy” z betonu na włókno poprzez naprężenia poprzeczne w powłoce włókna. Zjawisko to zależy od geometrii i wytrzymałościowych właściwości materiałów włókna oraz kleju. Przedstawiony system może zostać z powodzeniem wykorzystany do wykrywania i lokalizowania zarysowań w betonie

już we wczesnej fazie obciążenia, kiedy mikro-zarysowania niewidoczne gołym okiem nie mają jeszcze istotnego wpływu na pracę materiału.

Współcześnie bardzo obszerny projekt badawczy pod nazwą TRUSS [12], związany z analizą bezpieczeństwa konstrukcji, prowadzony jest przez konsorcjum 5 uczelni, 11 przedsiębiorstw i 1 instytutu badawczego, łącznie z 5 europejskich krajów, w ramach Działania Marii Skłodowskiej-Curie (program Horyzont 2020). Istotnym obszarem badań pozostaje rozwinięcie światłowodowej techniki pomiarowej do monitorowania mostów i innych konstrukcji wielkogabarytowych. Specjaliści skupiają swoją uwagę na możliwości identyfikowa-

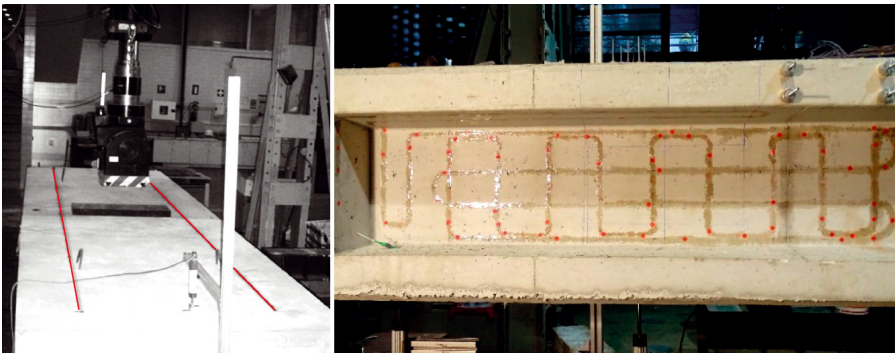
nia i oceny zarysowań w betonie. Do przykładów eksperymentów laboratoryjnych przeprowadzonych w ramach projektu zaliczyć można m.in. zginanie płyty żelbetowej z przyklejonymi do powierzchni włóknami światłowodowymi czy też analizę trajektorii naprężeń głównych w strefie przypodporowej belki częściowo sprężonej. W pracy [8] zaproponowano także algorytmy do wyznaczania szerokości rozwarcia rysy (rys. 1.).

Badania w Laboratorium Politechniki Krakowskiej

Prace nad wdrożeniem światłowodowej technologii pomiarowej trwają również w Polsce, m.in. w Instytucie Materiałów i Konstrukcji Bu-

BADANIA W POLSCE

Prace nad wdrożeniem światłowodowej technologii pomiarowej trwają również w Polsce, m.in. w Instytucie Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej oraz innych jednostkach. Firma SHM System realizuje obecnie projekt w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020.

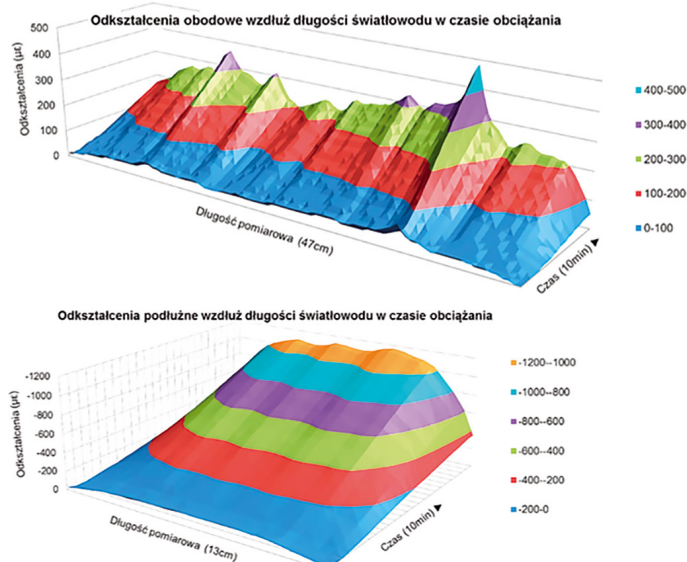


Rys. 1. Przykłady badań laboratoryjnych w ramach projektu TRUSS [8]

dowlanych Politechniki Krakowskiej. Wszystkie opisane poniżej badania zostały przeprowadzone przy współpracy z firmą SHM System [11], realizującą obecnie projekt badawczy pt. *Opracowanie nowego czujnika światłowodowego umożliwiającego wyznaczanie profili pionowych i poziomych przemieszczeń badanych obiektów na odcinkach o długości do 120 km.* ►



Rys. 2. Widok badanej próbki [materiały własne]



Rys. 3. Dystrybucja odkształceń obwodowych (rozciągających) i podłużnych (ściskających) [opracowanie własne]

Projekt ten wykonywany jest w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020. W pomiarach, dzięki uprzejmości firmy INTERLAB, wykorzystano reflektometr optyczny OBR4600 produkcji Luna Technologies, umożliwiający odczytanie światłowodów w oparciu o zjawisko rozpraszania Rayleigha.

Jednym z pierwszych badań, na podstawie którego powstała praca [10], była próba zginania aluminiowego płaskownika. Na dolnej i górnej powierzchni przyklejono włókno światłowodowe z wykorzystaniem różnych środków adhezyjnych. Eksperyment umożliwił uzyskanie obrazu odkształceń wzdłuż długości elementu, również w zakresie dużych przemieszczeń i odkształceń plastycznych. W innych badaniach analizowano możliwość zatapiania włókien wewnątrz elementów żelbetowych, mocowania do prętów zbrojeniowych, do powierzchni belek żelbetowych, elementów wykonanych jako kompozytowe, a także do powierzchni ścian murowych. Obiecujące rezultaty w zakresie identyfikowania lokalizacji zarysowań uzyskano z badania ściskanej walcowej

próbki betonowej, na której powierzchni przyklejono światłowód w taki sposób, aby uzyskać 3 podłużne odcinki pomiarowe (odpowiadające odkształceniom ściskającym) oraz 2 obwodowe (odpowiadające odkształceniom rozciągającym). Na rysunku 2 pokazano widok opomiarowanej próbki, a na rysunku 3 przykładowe wykresy odkształceń rozciągających i ściskających w dziedzinie czasu i długości światłowodu. Lokalne ekstrema wartości odkształceń obwodowych odpowiadały powstałym na próbce zarysowaniom.

Wnioski

Zebrane w wyniku przeprowadzonych doświadczeń wnioski posłużyły jako podstawa do opracowania programu dalszych badań, realizowanych obecnie w ramach rozprawy doktorskiej autora. Jej celem będzie między innymi zaproponowanie rozwiązania pomiarowego do identyfikowania lokalizacji rys w betonie oraz szacowania szerokości ich rozwarcia, w postaci profilu kompozytowego z zespolonymi włóknami światłowodowymi, wiążanego do zbrojenia i zatapianego w betonie.

Bibliografia

- [1] Brandt A. M., Radomski W., Zbigniew Wasutyński. Życie i dzieło. Warszawa, Fundacja PZITB Inżynieria i Budownictwo, 2013.
- [2] Skłodowski M., Współczesny monitoring obiektów budowlanych. „Przegląd Budowlany” 3/2009, s. 37–46.
- [3] Samiec D., Distributed fibre-optic temperature and strain measurement with extremely high spatial resolution. “Photonik International” 6/2011.
- [4] 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, s. 587–608.
- [5] 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.
- [6] Delepine-Lesoille S., Merliot E., Boulay C., Quétel L., Delaveau M., Courteville A., Quasi-distributed optical fibre extensometers for continuous embedding into concrete: design and realization. “Smart Materials and Structures” 15/2006, s. 931–938.
- [7] Li W., Bao X., High spatial resolution distributed fiber optic technique for strain and temperature measurements in concrete structures. International Workshop on Smart Materials & Structures, SHM and NDT for the Energy Industry. Calgary, Alberta, Canada, October 7-10, 2013.
- [8] Barrias A., Concrete structures monitoring with OBR based distributed optical fiber sensors (DOFS). COST TU1402: Quantifying the Value of Structural Health Monitoring. Copenhagen, 24th August 2016.
- [9] Sieriko 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.
- [10] Jedliński S., Zastosowanie światłowodów w systemach monitorowania konstrukcji [praca magisterska]. Politechnika Krakowska. Kraków, 2014.
- [11] www.shmsystem.pl
- [12] trussin.eu.

Streszczenie. W artykule opisano wybrane przykłady badań laboratoryjnych, których celem było zweryfikowanie przydatności światłowodowej techniki pomiarowej do praktycznych zastosowań inżynierskich. Światłowody, ze względu na wiele zalet, mają szansę stać się przełomem w dziedzinie inżynierii lądowej zwanej monitorowaniem konstrukcji (ang. *structural health monitoring*). Do rozwiązania pozostaje jednak wiele problemów technicznych, związanych między innymi ze sposobem montażu i zabezpieczenia delikatnych włókien światłowodowych przed uszkodzeniami mechanicznymi. Opracowanie rozwiązań umożliwiających pozyskiwanie wiarygodnej i kompleksowej wiedzy na temat pracy obiektu budowlanego ma w ogólności prowadzić do poprawy jego bezpieczeństwa przy jednoczesnym minimalizowaniu nakładów finansowych.

Słowa kluczowe: światłowody, pomiary odkształceń, zarysowanie, badania laboratoryjne

Abstract. APPLICATION OF OPTICAL FIBERS IN ENGINEERING MEASUREMENTS ON THE EXAMPLE OF SELECTED LABORATORY TESTS.

The article describes some examples of laboratory tests, which aim was to verify the usefulness of fiber optic measurement technology for practical engineering applications. Optical fibers, due to the many advantages, have a chance to become a crucial solution in the field of civil engineering called structural health monitoring. However, there are many problems to solve related to, inter alia, the way of mounting and protection of weak fibers from mechanical damage. Preparing solutions for obtaining reliable and comprehensive knowledge about structure operation should generally lead to improved safety, while minimizing financial outlay.

Keywords: optical fibers, strain measurements, cracks, laboratory tests