

*Aleksander Wosniok**, *Lukasz Krywult***, *Sascha Liehr**,
*Katerina Krebber**, *Mario Wendt**, *Andrzej Chrost***

MONITORING KONSTRUKCJI ZIEMNYCH PRZY ZASTOSOWANIU ROZŁOŻONYCH PRZESTRZENNIE ŚWIATŁOWODOWYCH SENSORÓW OPTYCZNYCH, ZINTEGROWANYCH W GEOSYNTETYKACH

1. Wstęp — światłowodowe sensory optyczne w geosyntetykach

Postęp technologiczny ostatnich lat oraz obserwowany wzrost częstotliwości występowania ekstremalnych wydarzeń atmosferycznych niesie za sobą również znaczne podniesienie wymagań wytrzymałościowych konstrukcji ziemnych, takich jak nasypy drogowe i kolejowe, tamy i zapory. Poszukiwanie nowych materiałów i rozwiązań w celu dopasowania wspomnianych konstrukcji do wymagań dnia dzisiejszego i chęć sprostania zadaniom w przyszłości doprowadziły do gwałtownego rozwoju geosyntetyków w postaci całej palety geotkanin, geosiatek oraz geokompozytów jako materiałów spełniających funkcje separacyjne, filtracyjne lub zbrojeniowe.

Wzrost wymagań wytrzymałościowych budowli ziemnych oraz coraz większa uwaga poświęcana standardom bezpieczeństwa cywilnego przyczyniły się do olbrzymiego rozwoju metod monitoringu tych budowli. Relatywnie nową, prężnie rozwijającą się gałęzią są tutaj sensory optyczne. To właśnie zalety materiałowe tych światłowodowych sensorów optycznych, tzn. niewielkie rozmiary, odporność na silne pola elektromagnetyczne, chemicznie trujące środowiska oraz wpływ jonizującego promieniowania, otwierają przed nimi szeroką gamę zastosowań. Światłowodowe sensory optyczne umożliwiają również monitorowanie konstrukcji ziemnych w sposób rozłożony przestrzennie, a nie tylko punktowo, jak w przypadku tradycyjnych metod tj. za pomocą tensometrów, piezometrów, czy też inklinometrów. Opisane zalety w połączeniu z możliwością finansowo korzystnej integracji tych sensorów

* BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, Niemcy

** ZPPUH BUDOKOP Sp. z o.o., Mysłowice

w geosyntetykach przyczyniają się do bezkonkurencyjności tych rozwiązań dla monitoringu naprężeń, temperatury oraz chemicznych parametrów w czasie rzeczywistym, przy zakresach pomiarowych od stu metrów do nawet kilkunastu kilometrów.

W punktach 2 i 3 zostają przedstawione zasady działania sensorów bazujących na podstawowych grupach światłowodów szklanych (GOF) oraz polimerowych (POF). W punktach tych znajduje się również opis parametrów technicznych poszczególnych czujników wraz z prezentacją wyników ich testów w terenie.

2. Monitoring konstrukcji ziemnych przy użyciu światłowodów szklanych (GOF)

Komercyjnie dostępne na rynku są geosyntetyczne maty pomiarowe wyposażone w czujniki światłowodowe z siatką Bragga (siatka dyfrakcyjna — czujniki typu FBG), skonstruowane na rdzeniu standardowego światłowodu szklanego. Zasada działania takiego czujnika bazuje na liniowej zmianie długości odbitej fali Bragga, która jest wprost proporcjonalna do zmian temperatury i naprężenia. Te punktowe czujniki FBG (długość pojedynczego czujnika wynosi kilka milimetrów) „wpisane” są w dowolnych miejscach w rdzeniu światłowodu, umożliwiając wielopunktowy pomiar w czasie rzeczywistym naprężeń i/lub temperatury, przy użyciu urządzenia odczytującego zwanego interrogatorem. Zakres naprężeń mierzonych za pomocą tych czujników światłowodowych z siatką Bragga nie przekracza 0,6—1%, co odpowiada jednakże pomiarowi w szerokim zakresie zmian temperatury powyżej 500°C [14].

W przypadku większości geotechnicznych konstrukcji, rozciągających się na długościach sięgających nawet kilkunastu kilometrów (np. wały rzeczne) często bardzo trudno jest dokładnie przewidzieć miejsca tzw. „słabe punkty” konstrukcji, które w szczególności podatne są na uszkodzenia. Istnieje więc tutaj potrzeba monitoringu uszkodzeń w sposób ciągły (rozłożony przestrzennie) na całej długości konstrukcji, a nie tylko w wybranych punktach.

Opisany poniżej sensor Brillouin stanowi innowacyjne rozwiązanie dla rozłożonej przestrzennie kontroli uszkodzeń konstrukcji w czasie rzeczywistym. System pomiarowy wykorzystujący efekt stymulowanego rozproszenia Brillouin (Stimulated Brillouin Scattering — SBS) w światłowodach szklanych umożliwia rejestrację zmian naprężeń i temperatury na odcinkach dochodzących nawet do 20 km i z dokładnością jej lokalizacji wynoszącą 2–3 m. Właściwości materiałowe światłowodów szklanych ograniczają jednakże zakres mierzonych naprężeń lokalnych do 1–1,5%, co odpowiada pomiarowi zmian temperatury w zakresie powyżej 500°C.

2.1. Zasada działania sensora Brillouin

Pierwsze próby zastosowania SBS dla celów rozłożonego przestrzennie pomiaru naprężeń i temperatury zostały zaprezentowane już 20 lat temu [3, 6]. SBS jest najbardziej dominującym efektem nieliniowym w jednomodowych światłowodach szklanych i opisuje wzajemne oddziaływanie w rdzeniu światłowodu dwóch wiązek światła laserowego o minimalnie różnych częstotliwościach fali, wprowadzonych w przeciwnym kierunku propagacji

do obu końców światłowodu. Wskutek tego oddziaływania zostaje wzbudzona ruchoma fala akustyczna w rdzeniu światłowodu modulująca jego współczynnik załamania światła. Modulacja ta, jako wymuszone minimalne zmiany gęstości materiału rdzenia światłowodu, prowadzi do rozproszenia, odbicia w przeciwnym kierunku wiązki światła laserowego o większej częstotliwościach fali. Wskutek efektu Dopplera (odbicie fali optycznej na ruchomej fali akustycznej) obserwujemy, podobnie jak podczas pomiaru radarem prędkości samochodów, zmianę częstotliwości fali wiązki odbitej. Rejestrowane tutaj tzw. charakterystyczne przesunięcie częstotliwości (Brillouin Frequency Shift — BFS) jest funkcją liniową naprężeń i temperatury rdzenia światłowodu, co wykorzystuje się do wyznaczania obu wspomnianych wielkości fizycznych.

Pierwsze systemy rozłożonego przestrzennie pomiaru naprężeń i temperatury metodą Brillouin bazowały na analizie lub reflektrometrii optycznej w zakresie czasu (Brillouin Optical Time–Domain Analysis — BOTDA lub Brillouin Optical Time–Domain Reflectrometry — BOTDR) [1]. W powyższych systemach wprowadzane do światłowodu pomiarowego krótkie impulsy optyczne zostają rozpraszane (odbite) w różnych miejscach światłowodu na skutek oddziaływania Brillouin, przy czym czas, który upływa pomiędzy wysłaniem impulsu a jego powrotem, lokalizuje miejsce pomiaru. Dodatkowo rejestrowane przesunięcie częstotliwości BFS informuje o występujących w danym miejscu naprężeniach lub też zmianach temperatury.

W roku 1996 została przedstawiona alternatywna metoda Brillouin, umożliwiająca pomiar w zakresie częstotliwości (Brillouin Optical Frequency–Domain Analysis — BOFDA) [2]. Metoda ta bazuje na wyznaczaniu za pomocą analizatora sieci tzw. funkcji przenoszenia w zakresie częstotliwości. Stosując następnie przekształcenie matematyczne odwrotnej transformaty Fouriera (IFFT) możliwe jest przekształcenie wspomnianej funkcji przenoszenia w odpowiedź pulsową w zakresie czasu, analogicznie do metody BOTDA. W systemie BOFDA do światłowodu pomiarowego wprowadzana zostaje ciągła wiązka światła laserowego (a nie krótkie impulsy jak w BOTDA), która dodatkowo podlega sinusoidalnej modulacji amplitudowej. Funkcja przenoszenia wyznaczana jest punktowo, tzn. dla każdej częstotliwości modulacyjnej. Rezultatem takiego wąskopasmowego pomiaru jest polepszenie stosunku sygnał/szum oraz wzrost zakresu dynamiki w porównaniu z parametrami systemu BOTDA. Największą zaletą systemu BOFDA jest jednakże możliwość rezygnacji ze stosowania szybkich układów próbkowania, konwersji i gromadzenia danych, co znacznie przyczynia się do redukcji kosztów całego systemu, a to z kolei wpływa na jego atrakcyjność dla użytkowników przemysłowych.

2.2. Wyniki testów w terenie

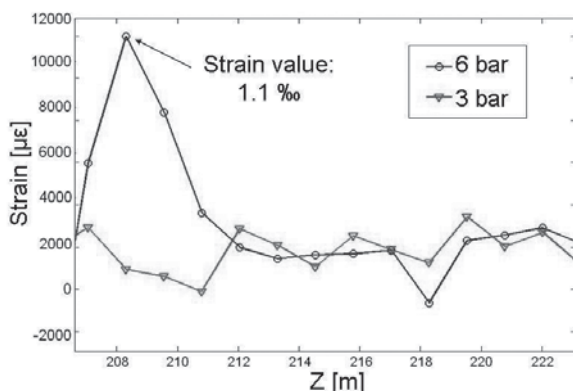
Za pomocą rozłożonego przestrzennie systemu Brillouin można więc monitorować w czasie rzeczywistym mechaniczne odkształcenia (naprężenia) rozległych konstrukcji geotechnicznych. Od kilku lat wprowadzana skuteczna integracja tych sensorów w tekstyilia techniczne [10–13] przyczynia się do gwałtownego wzrostu ich zastosowań dla monitoringu

konstrukcji ziemnych (np. wałów rzecznych). Rysunek 1 przedstawia symulację uszkodzenia wewnętrznego stoku doświadczalnego wału ochronnego uniwersytetu w Hanowerze. Deformacja mechaniczna została wykonana tutaj wielokrotnie za pomocą poduszki podnośnej (zmieniając ciśnienie poduszki od 0 do 6 bar).



Rys. 1. Wał ochronny uniwersytetu w Hanowerze — symulacja uszkodzenia wewnętrznego stoku

Wyniki pomiarów (rys. 2) przeprowadzonych za pomocą geotekstyli z „wsztytymi” sensorami GOF (biały materiał na rys. 1) wskazują na pewnego rodzaju martwy zakres sensorów. W przedziale do 3 bar wywołana deformacja mechaniczna została przeniesiona w postaci naprężeń wyłącznie na konstrukcję kabla ochraniającego światłowód pomiarowy. W obliczu wąskiego zakresu pomiarowego naprężeń (do 1–1,5%), odpowiednia konstrukcja kabla umożliwia więc dopasowanie okna pomiarowego do przewidywanych naprężeń.



Rys. 2. Wyniki pomiarów naprężeń metodą BOFDA za pomocą sensorów Brillouin zintegrowanych w geotekstyliach

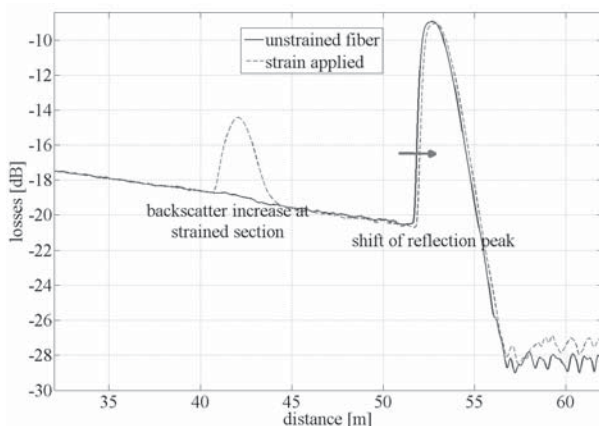
3. Monitoring konstrukcji ziemnych przy użyciu światłowodów polimerowych (POF)

W celu przezwyciężenia ograniczeń materiałowych światłowodów szklanych i związane- go z tym wąskiego zakresu pomiarowego naprężeń coraz mocniej w ostatnich latach zakorze-

nia się stosowanie standardowych światłowodów polimerowych (POF) do celów rejestracji odkształceń mechanicznych. Właściwości POF pozwalają na wyznaczanie naprężeń względnych w przedziale do 45% oraz roszą nadzieję na realizację pomiaru wilgotności.

3.1. Zasada działania sensora optycznej reflektrometrii w dziedzinie czasu (OTDR)

Początki techniki pomiarowej do wyznaczania w czasie rzeczywistym naprężeń rozłożonych przestrzennie sięgają roku 2004. Zaprezentowana w [4] metoda reflektrometrii w dziedzinie czasu (Optical Time Domain Reflectometry — OTDR) wykorzystuje efekt elastycznego rozpraszania Rayleigh'a wprowadzanych do POF krótkich pulsów optycznych w funkcji czasu, która informuje o miejscu, gdzie nastąpiło rozproszenie. Poziom rozpraszane światła zależy tutaj bezpośrednio od lokalnych naprężeń w rdzeniu POF. Rysunek 3 pokazuje dwie ścieżki pomiarowe OTDR nieobciążonego odcinka (linia ciągła) oraz tego samego odcinka, który uległ lokalnemu naprężeniu w okolicach 42-go metra (linia przerywana).



Rys. 3. Zasada działania POF OTDR. Naprężenie miejscowe o długości 1,4 m, widoczne na 42 metrze wynosi 16%

Oprócz lokalnego wzrostu poziomu rozpraszania Rayleigh'a zaobserwować można również przesunięcie końcowego piku, powstałego na skutek odbicia Fresnela od końca światłowodu pomiarowego.

Powyższe pomiary przeprowadzone zostały za pomocą komercyjnego urządzenia szwajcarskiej firmy Sunrise Luciol. Przyrząd ten wykorzystuje do pomiarów diodę laserową o długości fali 650 nm. Zakres dynamiki wynosi 35 dB, co przy użyciu standardowych światłowodów skokowych PMMA POF umożliwia pomiary w sposób rozłożony przestrzennie w zakresie do 100 m. Rozdzielczość przestrzenna wynosi przy tym 1,5 mm. Dzięki zastosowaniu specjalnych światłowodów gradientowych („perfluorinated POF”) o niskim tłumieniu optycznym, istnieje możliwość zwiększenia zakresu pomiarowego do nawet 500 m, bez pogarszania rozdzielczości przestrzennej [7].

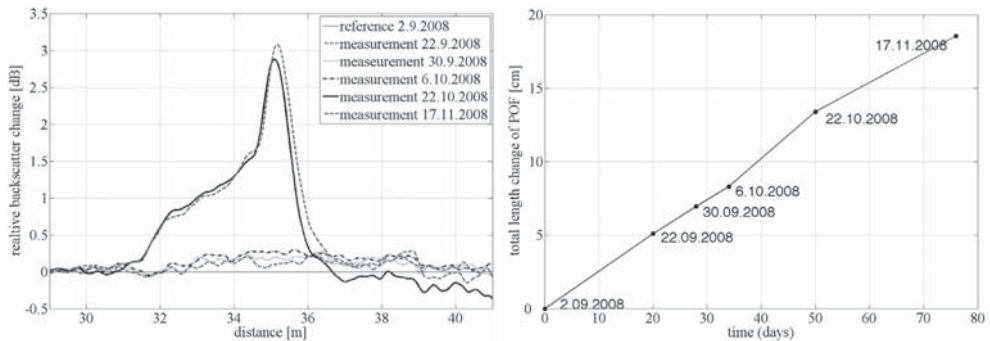
3.2. Wyniki testów w terenie

Do zalet przedstawionych powyżej światłowodów POF należy również ich odporność na uszkodzenia mechaniczne w porównaniu ze światłowodami szklanymi, co wiąże się z prostszą technologicznie integracją sensorów POF w geosyntetykach. W ramach europejskiego programu POLYTECT [5, 8, 9] oraz przy współpracy z firmami Gloetzl Baumesstechnik GmbH oraz ZPPUH BUDOKOP Sp. z o.o., oferującymi najnowsze techniki pomiarowe obiektów hydrotechnicznych, przeprowadzono testy w terenie innowacyjnej geosiatki o długości 10 m, ze zintegrowanym sensorem POF (standardowy światłowod PMMA Mitsubishi ESKA GHN4001). Geosiatka pomiarowa została zainstalowana w roku 2008, na półce zbocza objętego ruchami osuwiskowymi, na terenie Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów (rys. 4).



Rys. 4. Instalacja geosiatki pomiarowej z zintegrowanym sensorem POF na terenie Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów

Rozłożone przestrzennie pomiary naprężeń wykonano metodą OTDR przed instalacją (pomiar referencyjny) oraz wielokrotnie, w kilkunastudniowych odstępach czasowych, po jej zakończeniu. Rysunek 5 podsumowuje wyniki tych pomiarów.



Rys. 5. Wyniki pomiarów metodą POF OTDR

Na rysunku 5 po lewej stronie przedstawiono wyraźny wzrost optycznego sygnału rozproszenia wskutek lokalnego naprężenia sensora POF, w miejscu gdzie powstała szczelina. Obserwowany podczas dwóch ostatnich pomiarów przebieg rozproszenia wskazuje na niesymetryczny rozkład naprężeń wzdłuż geosiatki. Osiągnięty na 35-tym metrze poziom rozproszenia Rayleigh'a odpowiada naprężeniu lokalnemu sensora POF powyżej 10%. Użycie tutaj światłowodów szklanych jako sensorów, doprowadziłoby dawno w tym przedziale naprężeń do ich trwałego uszkodzenia.

Natomiast po prawej stronie przedstawiono praktycznie liniowy wzrost długości sensora POF w funkcji czasu. Wyliczona na jego podstawie prędkość obsuwania się zbrocza wynosi 2 mm na dzień.

4. Podsumowanie

Opisane powyżej „inteligentne” techniczne tekstyilia ze zintegrowanymi światłowodami szklanymi (GOF) oraz polimerowymi (POF) ukazują olbrzymie możliwości rynkowe dla zastosowań światłowodowych sensorów optycznych w celu podniesienia standardów bezpieczeństwa wielu konstrukcji budowlanych. Te bardzo cienkie światłowody optyczne o średnicy mniejszej niż 1 mm mogą mieć zastosowanie jako sensory działające w silnych polach elektromagnetycznych, w „surowych”, wybuchowych i chemicznie trujących środowiskach oraz podczas wpływu jonizującego promieniowania. Wysoka elastyczność (możliwe naprężenia miejscowe powyżej 40%) oraz wytrzymałość na mechaniczne uszkodzenia przyczynia się do szybkiego rozwoju technik pomiarowych wykorzystujących sensory POF. Z wprowadzenia w niedalekiej przyszłości metody I-OFDR (Incoherent Optical Frequency Domain), której to rozwojem zajmuje się optyczna grupa badawcza berlińskiego instytutu BAM, obiecuje się zwiększenie zakresu pomiarowego oraz polepszenie rozdzielczości przestrzennej sensorów POF.

5. Podziękowania

Autorzy artykułu pragną gorąco podziękować dyrekcji Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów za zgodę na przeprowadzenie testów innowacyjnej geosiatki wyposażonej w sensory POF oraz fachową pomoc pod względem geotechnicznym w wyborze interesującego miejsca zabudowy wspomnianej maty.

LITERATURA

- [1] Bao X., Webb D.J., Jackson D.A.: 22-km Distributed Temperature Sensor Using Brillouin Gain in an Optical Fiber. *Optics Letters* 18(7), 1993, pp. 552–554
- [2] Garus D., Krebber K., Schliep F., Gogolla T.: Distributed Sensing Technique Based on Brillouin Optical-fiber Frequency-domain Analysis. *Optics Letters* 21(17), 1996, pp. 1402–1404
- [3] Horiguchi T., Kurashima T., Tateda M.: A Technique to Measure Distributed Strain in Optical Fibres. *IEEE Photonics Technology Letters* 2(5), 1990, pp. 352–354

- [4] *Husdi I.R., Nakamura K., Ueha S.*: Sensing Characteristics of Plastic Optical Fibres Measured by Optical Time-domain Reflectometry. *Measurement Science and Technology* 15, 2004, pp. 1553–1559
- [5] *Krebber K., Liehr S., Lenke P., Wendt M.*: Distributed POF Sensor for Structural Health Monitoring — First Practical Application and Field Test Results. *Proc. of 18th Int. Conf. Plastic Optical Fibres*, 2009
- [6] *Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M.*: Distributed–temperature Sensing Using Stimulated Brillouin Scattering in Optical Silica Fibers. *Optics Letters* 15(18), 1990, pp. 1038–1040
- [7] *Liehr S., Lenke P., Wendt M., Krebber K.*: Perfluorinated Graded–index Polymer Optical Fibers for Distributed Measurement of Strain. *Proc. of POF Conference*, 2008
- [8] *Liehr S., Lenke P., Wendt M., Krebber K., Muenich J. C., Stempniewski L., Metschies H.*: Distributed Polymer Optical Fiber Sensor Integrated Technical Textiles for Monitoring of Masonry Structures Graded–index Polymer Optical Fibers for Distributed Measurement of Strain. *Proc. of SHMII–4*, 2009
- [9] *Liehr S., Lenke P., Wendt M., Krebber K., Seeger M., Thiele E., Metschies H., Gebresselassie B., Muenich J.C.*: Polymer Optical Fiber Sensors for Distributed Strain Measurement and Application in Structural Health Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 2009
- [10] *Noether N., Wosniok A., Krebber K., Thiele E.*: A Distributed Fiber Optic Sensor System for Dike Monitoring Using Brillouin Frequency Domain Analysis. *Proc. SPIE 7003*, 2008
- [11] *Noether N., Wosniok A., Krebber K., Thiele E.*: A Distributed Fiber-optic Sensor System for Monitoring of Large Geotechnical Structures. *Proc. of SHMII–4*, 2009
- [12] *Wosniok A., Noether N., Krebber K.*: Distributed Fiber Optic Sensor System for Temperature and Strain Monitoring Based on Brillouin Optical-Fibre Frequency–Domain Analysis. *Proc. of Eurosensors XXIII*, 2009
- [13] *Wosniok A., Noether N., Krebber K., Thiele E.*: Distributed Monitoring of Mechanical Deformation in River Dikes. *Proc. of Eurosensors XXII*, 2008
- [14] *Zhou Z., Ou J.*: Techniques Temperature Compensation for FBG Strain Sensors Used in Long-term Monitoring. *APCOM 2004, Khabarovsk, Russia*, 2004