



Mgr inż. Michał ZASADA, Miczasa@pg.gda.pl
Dr hab. inż. Krzysztof WILDE, prof. PG, Wild@pg.gda.pl
Katedra Mechaniki Budowli i Mostów Politechniki Gdańskiej
mgr inż. Andrzej BANACH, Andrzej.Banach@telekomunikacja.pl
Centrum Badań Rozwojowych, Telekomunikacja Polska S.A.

EKSPERYMENTALNE BADANIA CIĄGLYCH ŚWIATŁOWODOWYCH CZUJNIKÓW ODKSZTAŁCEŃ WYKORZYSTUJĄCYCH ROZPRASZANIE BRILLOUIN'A

EXPERIMENTAL EXAMINATION OF CONTINUOUS BRILLOUIN SCATTERING FIBER OPTIC STRAIN SENSORS

Streszczenie W niniejszym referacie przedstawiono wstępne badania eksperymentalne czujników światłowodowych do ciągłego pomiaru odkształceń. Badane sensory wykorzystują zjawisko rozpraszania Brillouin'a. Badania obejmowały testy systemu pomiarowego (BOTDR) dla włókien światłowodowych rozciąganych siłami skupionymi w trzech konfiguracjach obciążenia. Wyniki badań wskazują, że BOTDR poprawnie wskazuje poziomy odkształceń w badanych włóknach i określa miejsca przyłożenia obciążenia. Badany system może być użyty do ciągłego pomiaru odkształceń bardzo dużych obiektów inżynierii lądowej.

Abstract In this paper the experimental study on continuous Brillouin scattering fiber optic strain sensors is presented. The optical fiber were tested by imposing tension through three configurations of the experimental setup. The results of the measurements obtained from the BOTDR showed that the method can provide the information about the strain with sufficient precision and the locations of the load application can be estimated. The BOTDR might be used for strain measurements for very large civil engineering objects.

1. Wstęp

Podnoszenie poziomu bezpieczeństwa użytkowania konstrukcji inżynierskich o specjalnym znaczeniu oraz pojawienie się nowych technologii umożliwiających budowę bardzo dokładnych systemów diagnostycznych spowodowały szybki rozwój metod monitorowania stanu obiektów. Rozwój technologii optoelektronicznych oraz coraz lepsze rozpoznanie zjawisk towarzyszących propagacji światła we włóknie światłowodowym umożliwiły powstanie nowoczesnych czujników do pomiaru odkształceń takich jak: czujniki Fabry-Perot (F-P), czujniki Bragg'a (FBG), czujniki ciągłe oparte na wymuszonym rozpraszaniu Brillouin'a [1].

Najbardziej powszechne w użyciu, są obecnie czujniki FBG, które mierzą odkształcenia w punkcie i mogą być traktowane jako zamiennik powszechnie stosowanych tensometrów. Zaletą czujników FBG jest możliwość pomiaru odkształceń, przy zastosowaniu odpowiedniej konfiguracji urządzeń pomiarowych (interrogator i switch'e), nawet w 1200 punktach, przy użyciu jednego włókna światłowodowego i jednego zestawu pomiarowego zachowując

dokładności pomiarową na poziomie $\Delta\varepsilon = 10^{-6}$. Czujniki FBG wraz z urządzeniami pomiarowymi są oferowane w sprzedaży komercyjnej i są stosowane w konstrukcjach inżynierskich, przemyśle lotniczym, okrętowym i jachtowym. Nowym optoelektronicznym rozwiązaniem jest zastosowanie ciągłych czujników światłowodowych bazujących na wymuszonym rozpraszaniu Brillouin'a [2]. Tego typu rozwiązanie umożliwia pomiar odkształcenia na zwykłym pojedynczym światłowodzie w jego dowolnym punkcie na długości nawet 120 km.

W niniejszym referacie przedstawiono wstępne badania nad zastosowaniem ciągłych czujników wykorzystujących rozpraszanie Brillouin'a z intencją ich zastosowania do obiektów inżynierii lądowej. W pracy przedstawione są badania eksperymentalne wykonane na Politechnice Gdańskiej w grudniu 2006 przy współpracy z Telekomunikacją Polską S.A.

2. Zasada działania ciągłych czujników światłowodowych

Podstawą działania ciągłych czujników światłowodowych jest pomiar rozpraszania Brillouin'a, którego rozkład ulega zmianie pod wpływem odkształcenia włókna światłowodowego. Urządzenie o nazwie Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) służy do wymuszenia w rozpraszania Brillouin'a i pomiaru jego intensywności w założonym przedziale częstotliwości. Przy pewnej mocy wiązki świetlnej wysyłanej przez BOTDR w światłowodzie następuje wzbudzenie drgań siatki krystalicznej światłowodu, która powoduje rozproszenie się energii fali świetlnej. Rozproszona fala porusza się w kierunku przeciwnym do kierunku propagacji światła w światłowodzie. Analiza przesunięcia częstotliwości fali rozproszonej o największej częstotliwości umożliwia określenie odkształceń w danym punkcie światłowodu. Skanowanie całego światłowodu pozwala na pomiar odkształceń na całej długości włókna, czyli nawet do 120 km. Dokładność pomiarów odkształceń przez BOTDR jest podawana przez producenta jako $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-6}$ [3].

Głównym zastosowaniem BOTDR jest poszukiwanie uszkodzeń światłowodów, gdzie niezbędne jest sprawdzenie bardzo długich odcinków kabli światłowodowych z określeniem przybliżonego miejsca uszkodzenia. Potencjalne zastosowanie BOTDR do pomiarów w obiektach budowlanych wymaga bardzo dużych dokładności pomiarowych w ściśle określonym punkcie konstrukcji, nie jest niezbędne skanowanie na kilometrowych odcinkach obiektu. Systemy pomiarowe z zastosowaniem technologii wykorzystującej rozpraszanie Brillouin'a mogą mieć zastosowanie w konstrukcjach o bardzo dużych rozmiarach, na przykład: do pomiarów odkształceń torów bezстыkowych, pomiarów pełzania kabli w konstrukcjach sprężonych, kontrolowania stanu zestawu zbiorników na paliwa płynne, monitorowania stanu obiektów użyteczności publicznej, wykrywania niebezpiecznych pęknięć konstrukcji żelbetowych czy do kontrolowania stanu wałów przeciwpowodziowych [4,5].

3. Cel i zakres badań

Badania rozpoznawcze związane z użyciem BOTDR wykonano w lipcu i wrześniu 2006 w Centrum Badawczo Rozwojowym Telekomunikacji Polskiej w Lublinie. Badania eksperymentalne ukierunkowane na pomiar odkształceń na małych bazach pomiarowych, czyli z myślą o zastosowaniach w konstrukcjach budowlanych, wykonano w grudniu 2006 na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska PG. Celem eksperymentów było:

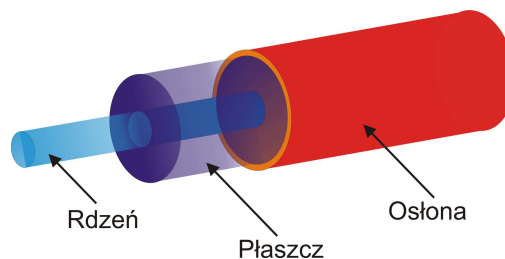
- Wyznaczenie parametrów włókna światłowodowego niezbędnych do konfiguracji urządzenia BOTDR: współczynnika odkształceniowego C_ε oraz zerowej częstotliwość Brillouin'a dla użytego włókna.
- Wstępna werfikacja czułości systemu pomiarowego oraz wstępna ocena algorytmu wyznaczania odkształceń stosowanego przez BOTDR.
- Zbadanie zachowania się układu pomiarowego przy różnych schematach obciążenia włókna światłowodowego i przy różnych poziomach obciążenia.

Zakres badań obejmował testy trzech schematów obciążenia:

- Włókno światłowodowe obciążone jedną siłą na odcinku o długości 7m,
- Włókno światłowodowe obciążone trzema siłami na odcinku 7m,
- Włókno światłowodowe obciążone jedną siłą na odcinku 4cm,

4. Badania eksperymentalne

Do pomiarów zastosowano włókno światłowodowe Double Cladding firmy Lucent o długości około 5300 m. Jest to typowe włókno światłowodowe, które składa się z trzech części: szklanego rdzenia i płaszcz oraz poliuretanowej osłony (Rys. 1). Średnica płaszcz wynosi $125\mu\text{m}$. Wytrzymałość gwarantowana szkła we włóknie wynosiła 700 MPa, zaś osłony 16 MPa [2]. Ze względu na parametry mechaniczne poszczególnych elementów włókna światłowodowego konieczne było zaprojektowanie odpowiedniego sposobu mocowania obciążenia, w taki sposób aby było ono przekazywane bezpośrednio na płaszcz szklany. Osłona poliuretanowa uplastycznia się przy bardzo małym obciążeniu i z tego powodu siły przyłożone do płaszcz po przekroczeniu pewnej wartości nie są przekazywane na szklany rdzeń i płaszcz, co jest warunkiem właściwego działania czujnika. Zjawisko zsuwania się obciążenia wraz z poliuretanową osłoną zaobserwowano podczas badań przygotowawczych.



Rys. 1. Budowa włókna światłowodowego, Double Cladding firmy Lucent

Poliuretanową osłonę usunięto z włókna używając stripper'a typu Miller. Następnie do czystego szkła przyklejano krótką, naciętą tulejkę o małej średnicy wykonaną z PCV. Do klejenia wykorzystano dwuskładnikowy klej epoksydowy. Po związaniu kleju do pierwszej tulejki przyklejono naciętą dłuższą tulejkę o większej średnicy, na którą po połączeniu z mniejszą tuleją nakładano przygotowane do tego celu pierścieniowe ciężarki. Taki sposób przykładania obciążenia gwarantował punktowe, osiowe obciążanie włókna siłami o zadanej wielkości i nie było konieczne rozwijanie włókna ze szpulki. Zaproponowany system obciążania włókna został zastosowany do wszystkich badanych schematów obciążenia.

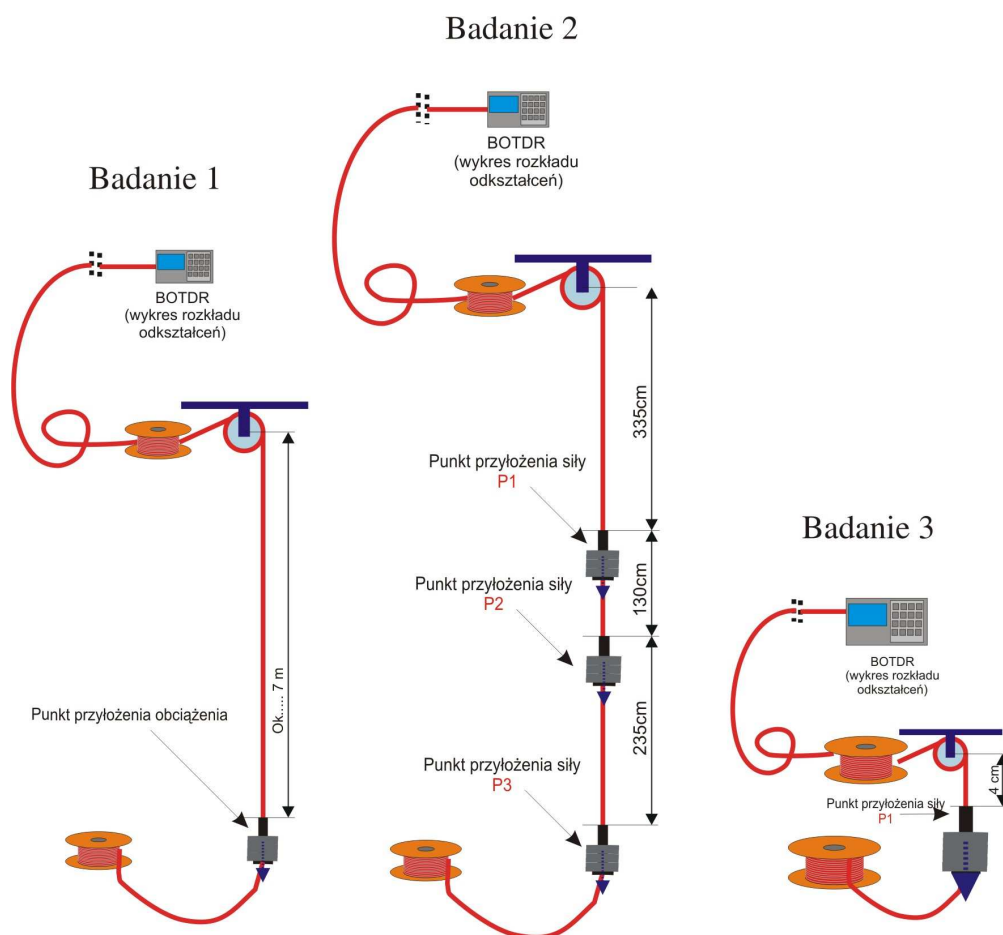
4.1 Badanie nr 1. Wyznaczenie charakterystyk włókna pomiarowego.

Celem pierwszego badania było wyznaczenie charakterystyk włókna pomiarowego, czyli: współczynnika odkształceniowego C_ε oraz zerowej częstotliwości Brillouin'a ν_{B0} . Te

parametry są różne dla każdego rodzaju włókien. Zależność pomiędzy częstotliwością odpowiadającą maksymalnej intensywności rozpraszania Brillouin'a a odkształceniem włókna światłowodowego (z pominięciem wpływu temperatury) określona jest wzorem (1):

$$v_B = v_{B0} \times (1 + C_\epsilon \times \epsilon) \quad (1)$$

gdzie: v_B oznacza częstotliwość odpowiadającą maksymalnej intensywności rozpraszania Brillouin'a, v_{B0} to zerowa częstotliwość Brillouina odpowiadająca maksymalnej intensywności rozpraszania Brillouin'a dla włókna nieobciążonego, C_ϵ oznacza współczynnik odkształceniowy zaś ϵ przedstawia odkształcenie włókna światłowodowego.

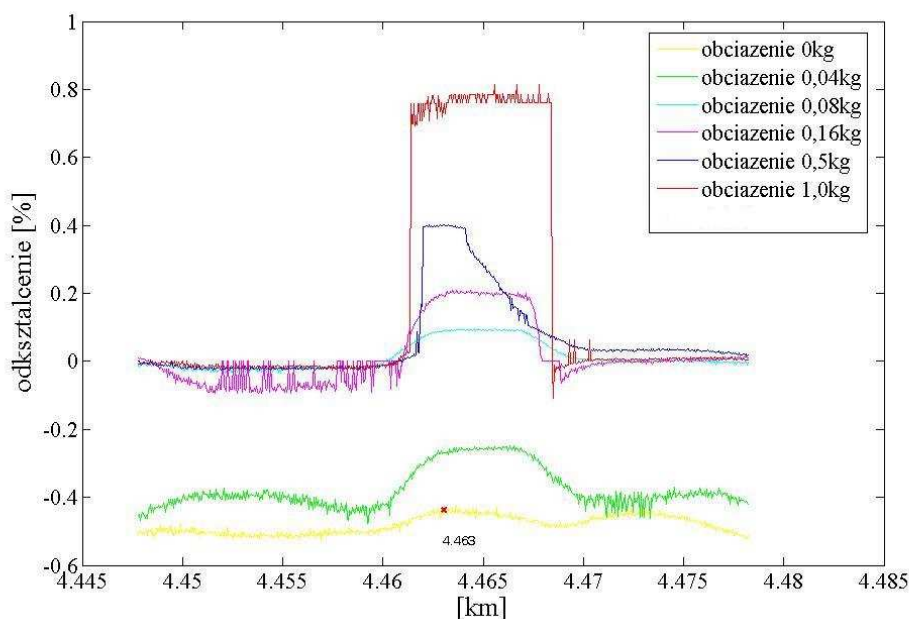


Rys. 2. Schematy obciążeń dla badania nr 1, 2 i 3.

Tablica 1. Badanie nr 1. Zestawienie danych

pomiar	wartość obciążenia [kg]	wartość naprężenia we włóknie [MPa]	przyjęty współczynnik odkształceniowy C_ϵ	obliczona analitycznie wartość odkształcenia [%]
1	0	0,00	1	0
2	0	0,00	1	0
3	0	0,00	1	0
4	0,04	32,00	1	0,045
5	0,04	32,00	3,53	0,045
6	0,04	32,00	3,53	0,045
7	0,08	64,00	3,23	0,091
8	0,08	64,00	3,23	0,091
9	0,16	128,00	3,23	0,182

10	0,16	128,00	3,23	0,182
11	0,16	128,00	3,23	0,182
12	0,16	128,00	3,23	0,182



Rys. 3. Badanie nr 1. Wykresy odkształceń z pomiarów.

Dla przedstawionego schematu obciążenia wykonano 14 pomiarów przy 6 poziomach obciążeń. Dwa pierwsze poziomy obciążenia służyły wyznaczeniu współczynnika odkształceniowego C_ε z przyjęciem jego wstępnej wartości równej 1. Wyniki obliczeniowych naprężeń i odkształceń sprężystych, przedstawione są w Tabl. 1. Obciążenie włókna przez 1 kg było szacowane jako ciężar zrywający światłowód. Odkształcenia pomierzone przy pomocy BOTDR przedstawione są na Rysunku 3. Wyniki pokazana są dla wycinka włókna od jego 4455,5 m do 4475,5 m. Wyniki eksperymentalne wskazują miejsce przyłożenia siły rozciągającej znajdującej się na odcinku od 4462 do 4469 m szczególnie dla dużych obciążeń. Analitycznie wyznaczone odkształcenie dla włókna obciążonego pierścieniami o wadze 0,16 kg wynosi 0,182%, wyznaczone zaś eksperymentalnie 0,188%.

Odczytanie z wykresu rozpraszania Brillouin'a i wykresu odkształceń z BOTDR'a (w miejscu, gdzie włókno nie jest obciążone) pozwoliło wyznaczyć zerową częstotliwość Brillouin'a $\nu_{B0} = 10,844$ GHz. Korzystając z obliczeń analitycznych dotyczących wartości odkształceń dla danego poziomu obciążenia oraz odczytanej zerowej częstotliwości Brillouin'a obliczono wartość współczynnika odkształceniowego $C_\varepsilon = 3,23$. Długość impulsu skanującego wykonanych pomiarów, wynosiła 2ns, co odpowiada uśrednianiu z odcinka 2m. Oznacza to, że urządzenie uśrednia wyniki odkształcenia z odcinków 2 m. Ta baza pomiarowa przesuwana jest co 5 cm stwarzając możliwość odtworzenie rzeczywistego stanu odkształcenia, z określeniem dokładnego punktu przyłożenia obciążenia.

4.2 Badanie nr 2. Pomiar rozkładu odkształceń przy zmiennym rozkładzie naprężeń we włóknie.

Badanie nr 2 miało na celu poznanie rozkładu odkształceń pomierzonego przez BOTDR, w przypadku zmiennego rozkładu naprężeń we włóknie. Aby uzyskać założony stan obciążono odcinek, włókna światłowodowego o długości 7m w trzech punktach (rys. 2). W

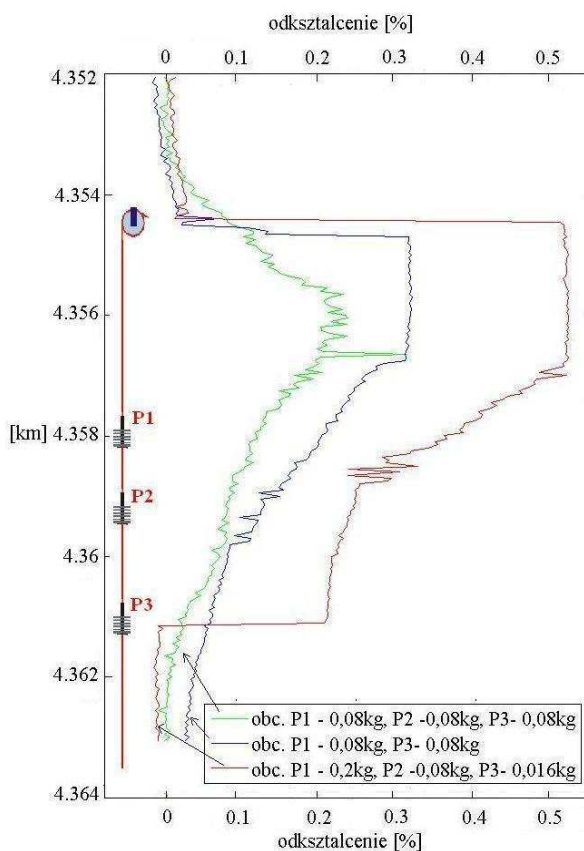
tablicy 2 zestawiono wartości obciążenia, które zostało przyłożone w punktach P1, P2 i P3. Tablica 3 przedstawia obliczenia analityczne wartości odkształceń na poszczególnych odcinkach.

Tablica 2. Badanie nr 2. Zestawienie danych

pomiar	wartość obciążenia przyłożonego w punkcie P1 [kg]	wartość obciążenia przyłożonego w punkcie P2 [kg]	wartość obciążenia przyłożonego w punkcie P3 [kg]	wartość naprężenia włókna przed punktem P1 [MPa]	wartość naprężenia włókna pomiędzy punktem P1 i P2 [MPa]	Wartość naprężenia włókna pomiędzy punktem P2 i P3 [MPa]
1	0,08	0,08	0,08	192,00	128,00	64,00
2	0,08	0,00	0,08	128,00	64,00	64,00
3	0,20	0,08	0,16	352,00	192,00	128,00

Tablica 3. Badanie nr 2. Odkształcenia obliczone analitycznie

pomiar	wartość obliczonego analitycznie odkształcenia włókna przed punktem P1 [%]	wartość obliczonego analitycznie odkształcenia włókna pomiędzy punktem P1 i P2 [%]	wartość obliczonego analitycznie odkształcenia włókna pomiędzy punktem P2 i P3 [%]
1	0,274	0,182	0,091
2	0,182	0,091	0,091
3	0,50	0,274	0,182



Rys. 4. Badanie nr 2. Wykresy odkształceń z pomiarów.

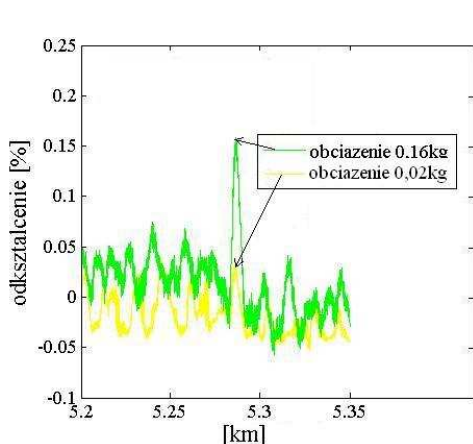
Wyniki pomiarów BOTDR przedstawione są na Rysunku 4. W przypadku trzeciej kombinacji obciążeń (Tablica 2, wiersz 3) analitycznie obliczone odkształcenia dla odcinka między podporą a punktem P1 wyniosły 0,5% zaś dla wartość eksperymentalna wyniosła 0.5087%. Wykres przebiegu odkształceń nie składa się z równoległych linii, ale krzywej łamanej, której kąty nachylenia wynikają z przyrostów siły rozciągającej i uśredniającej 2 metrowej bazy pomiarowej.

4.3 Badanie nr 3. Pomiar rozkładu odkształceń krótkiego równomiernie obciążonego odcinka.

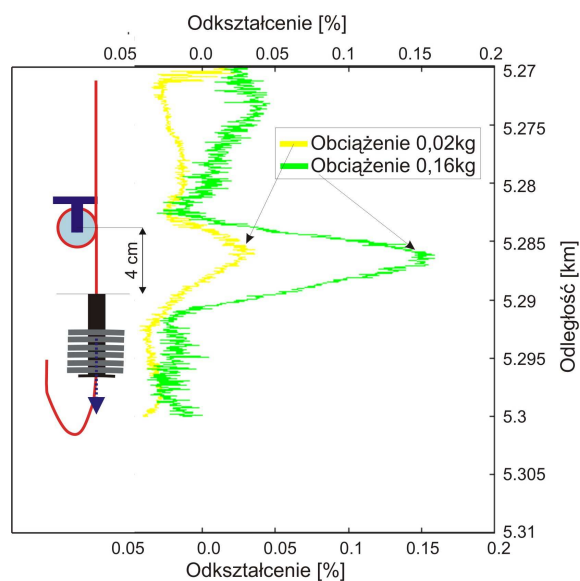
Badanie nr 3 miało na celu sprawdzenie czułości pomiarów dla przypadku obciążenia światłowodu na krótkim odcinku. Długość obciążonego odcinka wynosiła 4cm (Rys. 2). W Tablicy 4 zestawiono dane dotyczące obciążenia oraz przedstawione są wartości odkształceń wyznaczone analitycznie.

Tablica 4 Badanie nr 3. Zestawienie danych.

pomiar	wartość obciążenia [kg]	wartość naprężenia we włóknie [MPa]	obliczona analitycznie wartość odkształcenia [%]
1	0,02	16,00	0,02
2	0,16	128,00	0,182



Rys. 5 Badanie nr 3. Cała długość pomiarowa



Rys. 6 Badanie nr 3. Powiększenie obciążonego odcinka

Wyniki pomiaru odkształceń pomierzonych z BOTDR, odcinka od metra 5200 do 5350 przedstawione są na Rysunku 5. Pomiary umożliwiają wskazanie miejsca przyłożenia obciążenia (Rys. 6), jednakże wykres nie ma wyraźnej półki, która jednoznacznie wskazywałaby wartość odkształcenia. Analitycznie wyznaczona wartość odkształcenia dla obciążenia 0,16 kg to 0,182%, zaś BOTDR podaje wartość 0,152%. Niższa wartość pomiarowa wynika głównie z uśredniania z dużej bazy pomiarowej dla przypadku obciążenia przyłożonego tylko na odcinku 4 cm.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że pomiar rozpraszania Brillouin'a we włóknach światłowodowych może być stosowany do pomiarów odkształceń włókien światłowodowych. Włókna światłowodowo połączone z konstrukcją w taki sposób aby były przekazywane odkształcenia, mogą dać informację o stanie odkształceń elementów konstrukcji i teoretycznie możliwe jest uzyskanie bardzo dużych dokładności pomiarowych.

W przedstawionych pomiarach nie uzyskano dokładności gwarantowanych przez producenta. Jednakże, były to badania wstępne i nie uwzględniono tu wielu istotnych elementów jak na przykład wpływ temperatury. Dane dotyczące parametrów materiałowych szkła wzięte zostały z katalogu producenta i mogą różnić się od ich rzeczywistych wartości.

Dalsze prace skierowane będą na badania eksperymentalne, w których porównane zostaną wyniki pomiarów z zastosowaniem BOTDR, tensometrów elektrooporowych i tradycyjnych czujników zegarowych. Planowane są także prace związane z ukierunkowaniem analizy i obróbki sygnału na zwiększenie dokładności pomiarowej i poprawę możliwości lokalizacji przyłożenia obciążeń.

Literatura

1. Grattan K.T.V., Sun T.: Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators*, nr 82/2000.
2. Maaskant R., Alavie T., Measures R.M., Tadros G., Rizkalla S. H., Guha-Thakurta A.: Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring. *Cement and Concrete Composites*, nr 19/1997.
3. AQ8602 Optical Fiber Strain Analyzer. Instruction manual – instrukcja producenta firmy Ando.
4. Lee B.: Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, nr 9/2003.
5. Zasada M., Meronk B., Wilde K.: Zastosowanie czujników światłowodowych do monitorowania belek żelbetowych i zbiorników stalowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 602. Budownictwo Lądowe nr 58/2006.*
6. Źródło: „OFS. Fiber Optic Outside Plant Cable Specification. Issue 2 – March 2002”
Specyfikacja włókien Lucent, Double Cladding.

Podziękowania

Autorzy artykułu bardzo serdecznie dziękują Pani Dyrektor Pionu Centrum Badawczo-Rozwojowe TP S.A Magdalenie Mielniczek, Panu Dyrektorowi Departamentu Mobilności i Rozwoju Pracowników TP S.A. Jackowi Kowalskiemu za wsparcie inicjatywy wspólnych badań nad zastosowaniem BOTDR do pomiarów odkształceń. Bez ich pomocy niniejsze eksperymenty nie mogłyby się odbyć. Pragniemy także podziękować kierownictwie firmy Telekomunikacja Polska SA za wspieranie prac naukowych w dziedzinie inżynierii lądowej ukierunkowanych na poprawę bezpieczeństwa.