INTERFEROMETRYCZNE CZUJNIKI ŚWIATŁOWODOWE W MONITOROWANIU WYSOKOWYTĘŻONYCH ZBIORNIKÓW KOMPOZYTOWYCH

Wojciech Błażejewski, Paweł Gąsior, Jerzy Kaleta

Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Politechnika Wrocławska, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, tel. 71 320 39 19, <u>wojciech.blazejewski@pwr.wroc.pl</u>, <u>pawel.gasior@pwr.wroc.pl</u>, jerzy.kaleta@pwr.wroc.pl

INTERFEROMETRIC OPTICAL FIBER SENSORS FOR HIGH PRESSURE COMPOSITE VESSELS MONITORING

In the present work application of a new type of interferometric optical fiber based sensors for strain state monitoring of composite high pressure vessels for hydrogen storage is presented. The sensors in a form of composite tapes (so called SMARTape®) were installed on the outer surface of the vessel in two orthogonal directions: cross and longitudinal. The static pressure tests of a brand new vessel as well as a vessel with programmed defects were performed. The main goal of these works was to check measurement possibilities of new sensors and determine influence of defects (flaws) on strain field distribution in a high pressure vessel.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie aplikacji interferometrycznych czujników światłowodowych stosowanych do monitorowania stanu odkształceń kompozytowej powłoki nośnej zbiornika wysokociśnieniowego przeznaczonego do gromadzenia wodoru. Czujniki w postaci kompozytowych taśm SMARTape® zostały naklejone na zewnętrznej warstwie zbiornika w dwóch kierunkach: wzdłużnym i obwodowym. Przeprowadzone zostały statyczne badania ciśnieniowe zbiornika nowego oraz obiektu z programowymi uszkodzeniami. Celem prac było sprawdzenie przydatności aplikacji nowych czujników oraz określenie wpływu defektów w warstwie nośnej zbiornika na rozkład pola odkształceń.

1. Wprowadzenie

Stosowanie systemów monitoringu (okresowego lub też ciągłego) do kontroli stanu wytężenia zbiorników kompozytowych staje się coraz bardziej popularne. Standardowe metody wizualnej inspekcji nie wykryją uszkodzeń, które mogą mieć krytyczny wpływ na stan techniczny badanej konstrukcji, natomiast typowe metody pomiarowe (np. tensometria oporowa) prawdopodobnie ulegną uszkodzeniu w zbyt surowych warunkach środowiskowych [1]. Co raz większą popularność w dziedzinie kontroli stanu technicznego obiektów zaczynają zyskiwać nowoczesne metody pomiarowe oparte na technice światłowodowej. Wynika to

m.in. z wielu zalet czujników światłowodowych w porównaniu do "standardowych" metod pomiarowych. Wymienić tu należy możliwość pracy przy dużych poziomach zakłóceń elektromagnetycznych oraz w trudnych warunkach (znaczne zapylanie, wysokie temperatury, wysokie ciśnienia). Ponadto czujniki te cechują się dużą czułością pomiarową w szerokich zakresach pomiarowych (odkształcenie, temperatura). Jednocześnie dzięki małym wymiarom geometrycznym oraz niewielkiemu ciężarowi istnieje możliwość umiejscowienia głowicy pomiarowej w strukturze konstrukcji (np. wbudowanie w materiał kompozytowy) lub montaż na jej powierzchni. Dzięki dużym możliwościom multipleksacji istnieje możliwość stworzenia swoistego układu nerwowego monitorowanego obiektu. W niektórych zastosowaniach (np. zbiorniki paliwa) istotną rolę odgrywać będzie wysoki stopień tzw. iskrobezpieczeństwa.

Opisywane badania są uzupełnieniem prac, których opis jest przedstawiony w [2] i stanowią spójną całość realizowaną w ramach projektu StorHy [3].

2. Interferometryczny światłowodowy system monitorowania

Na rynku istnieje kilka firm oferujących różne systemu monitoringu, jednak niewiele jest takich, które mają w swojej ofercie systemy światłowodowe. Jednymi ze światowych liderów w tej branży są m.in.: Smartec SA (Szwajcaria, obecnie członek grupy Roctest), IPHT (Niemcy), FOS&S (Belgia), Osmos (Francja), czy też OZ Optics (Kanada).

Systemy pomiarowe oparte na technice światłowodowej można klasyfikować na kilka sposobów. Podstawowy podział związany jest z modulacją parametrów fizycznych fali świetlnej, będącej nośnikiem mierzonych wielkości. Można zatem wyróżnić następujące grupy czujników:

- amplitudowe,
- interferencyjne,
- z modulacją długości fali,
- polaryzacyjne.

Inna klasyfikacja czujników światłowodowych jest powiązana z wielkością (rozmiarem) mierzonego pola fizycznego:

- punktowe,
- pseudo-rozproszone (quasi distributed),
- rozproszone (distributed).

Największe zastosowanie w monitorowaniu stanu technicznego różnych obiektów znalazły czujniki z modulacją fazy fali świetlnej (czyli czujniki interferencyjne) oraz czujniki wykorzystujące modulację długości fali świetlnej propagowanej w włóknie światłowodowym (np. światłowodowe siatki Bragga – FBG).

Czujniki należące do grupy czujników interferometrycznych charakteryzują się modulacją fazy sygnału świetlnego propagowanego w układzie pomiarowym. Głowice pomiarowe w postaci światłowodu jednomodowego mogą osiągać długości od kilku centymetrów do kilkunastu metrów i są zintegrowane albo z powierzchnią testowanego obiektu (np. w postaci specjalnej taśmy – tzw. SMARTape®) albo umiejscowione wewnątrz monitorowanej struktury (np. "zagrzebane" w materiale kompozytowym, czy też zalane w betonie). Czujniki te przeznaczone są do pomiaru przemieszczenia (odkształcenia).

Pomiar polega na analizowaniu różnicy faz sygnałów optycznych rozchodzących się w dwóch ramionach interferometru Michelsona – pomiarowym oraz odniesienia. Ramię

pomiarowe jest w bezpośrednim kontakcie z badaną konstrukcją (może być np. przyklejone [4]). Natomiast ramię odniesienia jest odseparowana mechanicznie od monitorowanego obiektu, ale jest wystarczająco blisko, by temperatura obu ramion była jednakowa. Pozwala to wyeliminować wpływu fluktuacji temperatury na wyniki pomiarów. Pojawiająca się zmiana fazy fali świetnej jest wynikiem zmiany długości światłowodu, stanowiącego głowicę pomiarową. Odpowiada to zmianie stanu wytężenia np. zbiornika kompozytowego. W wyniku interferencji obydwu wiązek, możliwe jest po przez analizę prążków interferencyjnych ilościowe określenie odkształcenia czujnika, a tym samym monitorowanej konstrukcji.

Schemat układu analizującego, stosowanego w systemie pomiarowym SOFO® firmy SMARTEC, przedstawiony został na rysunku 1a. Najważniejszymi elementami systemu są: dwa połączone ze sobą interferometry Michelsona, źródło promieniowania, detektor a także podłączony do niego nanowoltomierz fazoczuły (Lock-in).



Rys. 1. Schemat systemu pomiarowego SOFO® firmy Smartec (na podst. [4]) (a) oraz przykładowa wydłużenia głowic interferometrycznych zainstalowanych na zbiorniku (b).

Promieniowanie ze źródła LED jest dzielone przez sprzęgacz kierunkowy na dwie wiązki o tej samej mocy: wiązkę odniesienia i wiązkę pomiarową. Propagowane są one w dwóch światłowodowych ramionach interferometru zakończonych zwierciadłami. Odbite od zwierciadeł promieniowanie optyczne z obu ramion interferometru wraca z powrotem do sprzęgacza, gdzie następuje interferencja. W wyniku pojawiających się odkształceń głowicy pomiarowej, na przykład wydłużeniu światłowodu o ΔL_1 , zmianie ulega droga, którą przebywa światło w tym odcinku włókna. Powoduje to, iż interferujące ze sobą wiązki promieniowania są względem siebie przesunięte w fazie.

Różnica w długości ramion interferometru pomiarowego ΔL_1 jest proporcjonalna do deformacji struktury ΔL_S i można ją opisać zależnościami (dla światłowodów szklanych) [5]:

$$\Delta L_s = \Delta L_1 \left(n\xi \right)^{-1} \cong 0.887 \Delta L_1 \tag{1}$$

$$\xi = 1 - \frac{n^2 [(1 - \nu)p_{12} - \nu \cdot p_{11}]}{2} \approx 0.78$$
⁽²⁾

gdzie: v – współczynnik Poisson'a, p_{ij} – tensor wydłużeniowo – optyczny.

Przykładowy pomiar wydłużenia głowicami SMARTape® zainstalowanych na zbiorniku w kierunku wzdłużnym oraz obwodowym w funkcji zmiany ciśnienia wewnętrznego przedstawiony został na rysunku 1b.

3. Badania statyczne zbiorników wysokociśnieniowych

Obiektem badawczym, na którym testowane były czujniki interferometryczne (SOFO), był zbiornik kompozytowy typu 3-go (liner aluminiowy z oplotem wzmacniającym wykonanym z włókna węglowego) o nominalnym ciśnieniu pracy wynoszącym 350 bar (rys. 2a). Pojemność zbiornika wynosiła 38 litrów, natomiast zmierzona długość części walcowej to 0,6 m. Przed rozpoczęciem badań na zewnętrznej powłoce zbiornika naklejone zostały czujniki SOFO (rys. 2b):

- 4 w kierunku wzdłużnym (każdy o długości bazy pomiarowej 0,58 m),

- 2 w kierunku obwodowym (nawinięte w przeciwnych kierunkach, każdy długości bazy pomiarowej 4,66 m).

Ponadto każdy z naklejonych czujników posiadał dodatkową głowicę kompensującą wpływ temperatury, umiejscowioną w pudełku ochronnym znajdującym się przy zbiorniku (widoczne na rysunku 3b).



Rys. 2. Zbiornik wysokociśnieniowy (a) oraz rozmieszczenie czujników typu SMARTape® (b).

Badania ciśnieniowe zostały zrealizowane przy użyciu urządzenia opisywanego szerzej w pracy stowarzyszonej [2]. Widok stanowiska pomiarowego wraz z wykorzystanym do pomiarów urządzeniem SOFO® V Reading Unit przedstawiony został na rysunku 3. W trakcie pierwszej próby (opisywanej w dalszej części jako: Krok 1) wykonane zostały pomiary referencyjne (rys. 4a). Zbiornik został obciążony statycznie w zakresie ciśnień od 0 do 350 bar, a w trakcie badań rejestrowane zostały co 50 bar odkształcenia powłoki zewnętrznej zbiornika mierzone przy użyciu czujników SOFO.

W kolejnych etapach (Krok $2 \div$ Krok 4) w kompozytowej warstwie nośnej wykonane zostały kolejno defekty w postaci dwóch nacięć [6]:

– Krok 2 – nacięcie w kierunku wzdłużnym (80 mm długości, 2 mm głębokości),

- Krok 3 - nacięcie w kierunku obwodowym (100 mm długości, 2 mm głębokości),

Krok 4 – obydwa nacięcia zostały powiększone (głębokość każdego z nich zwiększono do 4,5 mm).



Rys. 3. Stanowisko badawcze zbiorników wysokociśnieniowych.

Głębokość wprowadzonych defektów stanowiła ok. $10\div20\%$ grubości ścianki kompozytowej, co znacząco przekracza normy dla ciśnieniowych zbiorników przeznaczonych do gromadzenia wodoru [7]. Według cytowanych regulacji głębokość nacięcia nie powinna przekraczać 1,25 mm, przy czym zbiornik z takim uszkodzeniem musi przejść pozytywnie badania cykliczne w temperaturze pokojowej. Nie może on ulec zniszczeniu przy liczbie cykli mniejszej niż 9000 (dla badanego zbiornika zmiana ciśnienia w zakresie $20 \div 437,5$ bar).

Z przeprowadzonych badan wynika, iż wprowadzenie karbów (zdefektowanie) w warstwie nośnej zbiornika spowodowało niewielką zmianę rozkładu pola odkształceń. Można zauważyć nieznaczną zmianę nachylenia krzywej ciśnienie – odkształcenie (rys. 4b), pokazaną tutaj jako moduł różnicy (ABS) pomiędzy odpowiednimi charakterystykami zarejestrowanymi w Kroku 1 (referencyjnym) oraz kolejnych.



Rys. 4. Odkształcenia zbiornika zarejestrowane w trakcie badania referencyjnego – Krok 1 (a) oraz analiza różnicy odkształceń pomiędzy pomiarem referencyjnym i pomiarami wykonanymi dla kolejnych uszkodzeń (b).

4. Wnioski i uwagi końcowe

- Sprawdzono możliwości aplikacyjne nowej metody pomiaru stanu odkształcenia powłoki nośnej zbiornika wysokociśnieniowego do gromadzenia wodoru.
- Przeprowadzono badania na zbiorniku fabrycznie nowym oraz zbiorniku z uszkodzeniami programowanymi, przekraczającymi znacznie dopuszczalne normami defekty.
- Stwierdzono niewielki wpływ uszkodzeń na zmierzony rozkład pola odkształceń w testowym zbiorniku. Jest to związane ze zbyt dużą różnicą pomiędzy długością czujnika (głowicy pomiarowej) a rozmiarem defektu. Zastosowane czujniki uśredniają bowiem odkształcenia po całej swojej długości.
- Wprowadzone karby powodują lokalną zmianę w rozkładzie odkształceń w materiale kompozytowym, którą można zmierzyć stosując czujniki o mniejszej długości bazy pomiarowej (np. światłowodowe siatki Bragga).

Podziękowania

Badania wykonano w ramach projektu badawczego StorHy (Storage of Hydrogene, Integrated Project, 6th Framework Programme)

Literatura

- [1] Graver T. Inaudi D., Doornink J., Growing Market Acceptance for Fiber-Optic Solutions in Civil Structures, Proceedings of SPIE Volume 5589, Fiber Optic Sensor Technology and Applications III, pp. 44-55, 2004.
- [2] W. Blażejewski, P. Gąsior, J. Kaleta, P. Kotowski: Quasistatyczna próba rozrywania butli kompozytowych do gromadzenia paliw gazowych pod dużym ciśnieniem, XXIII Sympozjum Mechaniki eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka, 2008.
- [3] www.storhy.net
- [4] D. Inaudi, et al., Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil engineering structures, Sensors and Actuators, A 44, 1994, pp. 125-130.
- [5] C. D. Butter, G. B. Hocker, "Fiber optics strain gauge", Appl. Opt., 17 (1978) 2867-2869.
- [6] W. Blażejewski, P. Gąsior, J. Kaleta, A. Sankowska: Optical Fiber Sensors as NDT methods for strain state monitoring of high pressure composites vessels. Comparison of different types of OFS, 8-th International Conference on Durability of Composite Systems, Porto, Portugal, 2008.
- [7] Draft ECE Compressed Gaseous Hydrogen Regulation, Revision 12b, 12.10.03, GRPE Informal Group: Hydrogen/Fuel Cell Vehicles.