

Wojciech Błazejewski^{1*}, Andrzej Czulak², Paweł Gašior¹, Tomasz Pawlak³, Werner Hufenbach²

¹ Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Poland

² Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Dörnerstraße 26, Dresden D-01062, Germany

³ Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki, Mikrosystemów i Fotoniki, ul. Janiszewskiego 11/17, 50-372 Wrocław, Poland

* Corresponding author. E-mail: wojciech.blazejewski@pwr.wroc.pl

Otrzymano (Received) 26.02.2009

CIŚNIENIOWE BADANIA KOMPOZYTOWYCH PRÓBEK RUROWYCH WYKONANYCH METODĄ WYPLATANIA

Przedstawiono badania kompozytowych próbek rurowych wykonanych z materiału ES (kompozyt epoksydowo-szkłany) przy użyciu metody splatania. Metoda ta jest alternatywą do klasycznej metody nawijania i pozwala na wykonanie materiału wzmocnionego włóknem pod dowolnym kątem w zakresie od 5 do 86°. Jednak ta nowa technika układania wzmocnienia nie jest szeroko stosowana, m.in. ze względu na brak dokładnych analiz wytrzymałościowych gotowych struktur. Celem podstawowym badań było przeprowadzenie eksperymentu i późniejsze wykonanie symulacji MES. Badano próbki z ułożeniem wzmocnienia pod kątem 30, 45 i 60°. Jako medium wywierające ciśnienie użyto ściskanego osiowo stosu krążków gumowych wewnątrz próbek rurowych. Zastosowanie gumy pozwoliło na znaczne skrócenie czasu badań. W czasie badań mierzono siłę ściskającą (ciśnienie), przemieszczenie tłoczków oraz odkształcenie obwodowe próbki kompozytowej. Z uwagi na duże odkształcenia na powierzchni próbek (dochodzące do kilku procent) zastosowane zostały światłowodowe czujniki odkształceń w postaci światłowodowych siatek Bragga. Pozwoliło to zmierzyć bardzo dokładne przebiegi odkształceń i naprężeń w badanym materiale kompozytowym w zakresach, które były nieosiągalne dla klasycznych tensometrów oporowych. Otrzymane dane w przyszłości umożliwią przeprowadzenie planowanych symulacji komputerowych.

Słowa kluczowe: kompozyty wyplatane, metoda splatania, czujniki światłowodowe, FBG, NDT, właściwości mechaniczne, badania ciśnieniowe, próbki rurowe

PRESSURE TESTS OF COMPOSITE BRAIDED TUBE SPECIMENS

In the present paper tests of composite tube specimens made from glass-epoxy composite by braiding method are presented. That technique is an alternative one to the classical winding method and allows realization of reinforcement layer at an any angle in a range from 5° to 86°. However, because there are not precise strength analysis of finished structures, that new method is not a widespread. A main target of presented research was to carry out an experiment and prepare FEM analysis to compare obtained results. Three different tube types were tested: 30, 45 and 60°. They were differ from each other only by an angle of reinforcement. As a working medium a heap of rubber disks inside a specimen was applied. Application of rubber disks allowed to short an experiment duration. During the test a compressive force (pressure), displacement of pistons as well as deformation (strain) in circumferential direction were measured. Because of large deformation on the outer surface of specimens (even few percents) Fiber Bragg Gratings for strain measurements were used. It let to perform strain measurement very precisely in a range which was not possible to obtain by classical method (electric resistance wire strain gauge). Obtained test results will be very useful to realize FEM analysis in a nearest future. Fiber optic sensor technology offers the possibility of implementing "nervous systems" for infrastructure elements that allow health and damage assessment. Fiber Bragg Gratings used in measurements give information on local strain values of the composite specimens caused by internal pressure. It also makes possible to detect and monitor damages in a composite structure. The sensor system should ensure the assessment of the safety condition of the monitored object during production, long-term operation and periodic checks. Optical fiber sensor systems with Bragg gratings belong to the class of sensors where the measurement of the physical phenomenon causes the modulation of the light wavelength. The advantages of those solutions arise from properties of the optical fiber. The Bragg gratings sensors systems are easy to integrate with the composite material structures, and because of their spark-safety and first of all high sensitivity in wide measurement range as well as insensitiveness on the external electromagnetic field are particularly suitable for different types of applications, also in so called "smart materials". The basic principles of FBG sensors applications is a linear relation between wavelength λ on external variables like temperature and strain. The key question in the case of using FBG for monitoring the level of strain of composite layers is such an arrangement of sensors that it would be possible to monitor deformation of the object under examination in critical points of the structure. In the present paper sensors were installed on the outer surface of the composite tube specimens to measure its local deformations.

Keywords: braided composites, braided methods, optical fiber sensors, FBG, NDT, mechanical properties, pressure tests, GFRC (Glass Fiber Reinforced Composite), tube specimen

WPROWADZENIE

Kompozytowe elementy obrotowo-symetryczne, np. zbiorniki ciśnieniowe, rurociągi, wały, maszty itp., najczęściej wytwarzane są metodą nawijania wiązki włókna ciągłego. Metoda ta została już w pełni zautomatyzowana i jest szeroko stosowana [1-3]. Włókna warstwy kompozytowej ułożone są w sposób uporządkowany i zaprogramowany, stosownie do przewidywanych obciążeń konstrukcji. W metodzie nawijania włókna wykorzystuje się maszyny sterowane numerycznie, zwane nawijarkami, które swoją konstrukcją przypominają obrabiarki CNC. Niektóre elementy (kształty) są jednak kłopotliwe do wykonania, np. armatura rurociągów, kolanka, trójniki, redukcje itp. Znacznie łatwiej wykonać te elementy techniką wyplatania przy użyciu robota (manipulatora) i splatarki. Metoda splatania jest nową, rozwijającą się i alternatywną metodą do metody nawijania [4].

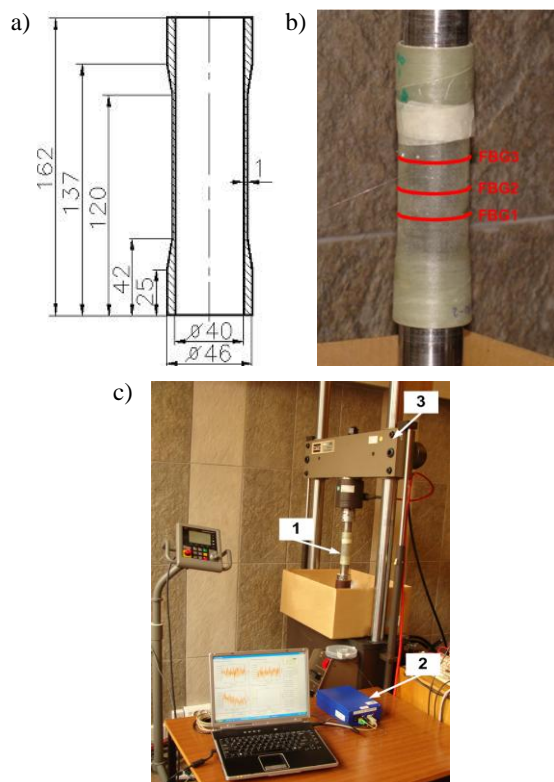
Metoda splatania wykorzystuje zasadę tkania (wyplatania) podobnie jak maszyna dziewiarska. Jej zasadniczą zaletą jest układanie w czasie jednego przejścia całej warstwy, nawet na znacznych krzywiznach i zmianach przekroju rdzenia. Jest to związane ze wzajemnym przytrzymywaniem się wiązek włókien zwłaszcza na krzywiznach. W metodzie nawijania na krzywiznach (np. sferyczna dennica zbiornika) wiązka włókien musi znajdować się w równowadze. Określa to kąt nawijania również na części walcowej, który jest niekorzystny np. dla zbiorników ciśnieniowych. Oznacza to, że należy tak wykonane warstwy narzucone przez krzywiznę dennicy zrównoważyć innymi, następnymi warstwami nawiniętymi na zbiorniku pod większym kątem. Kolejne warstwy jednak nie pokrywają dennicy w okolicach króćca. Użycie metody wyplatania stwarza znacznie większe możliwości wytwarzania oplotów nośnych zbiorników cylindrycznych, a mianowicie można wykonać oplot nośny od razu pod optymalnym kątem 54° . Wiązki włókien na dennicy nie zsuwają się, ponieważ podtrzymują się wzajemnie.

Inną zaletą metody splatania jest łatwiejsza możliwość umiejscawiania dodatkowych elementów pomiędzy wyplatany warstwami. Możliwe jest wprowadzenia do struktury warstw o określonych właściwościach (np. tłumiących pola E-M), a także czujników umożliwiających lokalny pomiar stanu odkształcenia bądź zmiany temperatury wewnątrz kompozytu.

Należy zwrócić uwagę, że kompozytowe oploty nośne wykonane technikami splatania i nawijania różnią się pod względem właściwości wytrzymałościowych, są to różne materiały. Jest to związane z większym uszkodzeniem włókien w czasie splatania, wiązki włókien przed umieszczeniem na maszynie muszą zostać przewinięte oraz w samym procesie splatania ocierają się na sucho, powodując wzajemne uszkodzenia. Także w celu poprawienia własności tkackich włókien są one pokryte tzw. preparacją włókienniczą (pokrycie włókiennicze, w postaci skrobi), która nieznacznie utrudnia późniejsze przesycanie włókien. Ponadto naciąg włókien w metodzie

wyplatania jest mniej kontrolowany niż w metodzie nawijania. Należy także podkreślić, iż splecione suche warstwy oplotu nośnego należy przesycić, np. wykorzystując metodę RTM. Ten sposób przesycania włókien jest mniej skuteczny od przesycania w wannie nasycającej na mokro w czasie procesu nawijania, gdzie każda wiązka rowingu jest nasycana w sposób najbardziej korzystny. Podobny proces sylenia włókien występuje w metodzie przeciągania (pultruzji) przy wytwarzaniu prętów i profili metodą ciągłą. Te wymienione i inne czynniki decydują o różnicy w otrzymywanych materiałach metodą nawijania i splatania. Dlatego zasadne jest przeprowadzenie badań materiałowych na próbkach rurowych w celu określenia właściwości wytrzymałościowych wyplatanych materiałów kompozytowych, które nie są znane. Pozwala to na uzyskanie parametrów niezbędnych do prowadzenia symulacji MES.

Opisywane w niniejszej pracy badania zostały przeprowadzone na próbkach wykonanych z włókna szklanego z syciwem epoksydowym. Ich geometria została przedstawiona na rysunku 1. Próbkki zostały wykonane metodą splatania z użyciem splatarki znajdującej się w ILK Drezno. Przebadane zostały próbki o trzech różnych kątach ułożenia wzmocnienia: 30° , 45° , 60° .



Rys. 1. Geometria kompozytowej próbki rurowej [5] (a), szczegółowy widok próbki z naklejonymi czujnikami FBG (b) oraz widok stanowiska pomiarowego (c): 1 - próbka, 2 - urządzenie pomiarowe FBG, 3 - maszyna wytrzymałościowa

Fig. 1. Geometry of composite tube specimen [5] (a) and views of real specimen with installed FBG sensors as (b) well as test setup for specimen testing (c): 1 - specimen, 2 - Signal Processing Unit for FBG sensors, 3 - hydraulic test system

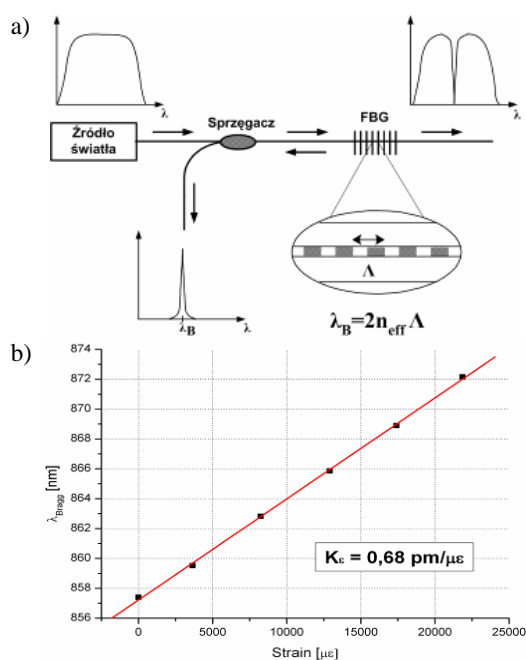
BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania próbek rurowych zrealizowano zgodnie ze sposobem III opisanym w pracy [5]. Metoda ta polega na ściskaniu, umieszczonych wewnątrz próbki rurowej, krążków wykonanych z elastomeru przy użyciu maszyny wytrzymałościowej MTS (rys. 1c). Uzyskuje się w ten sposób jednoosiowy stan naprężeń (występują tylko naprężenia obwodowe - sposób III [5]). Metoda pozwala uzyskać wyniki zbieżne z rezultatami z badań przeprowadzonych ciecżą, jednak tłoczki zamykające próbkę muszą być ze sobą połączone. Pozwala jednak na przeprowadzenie większej ilości badań w tym samym czasie, a ponadto nie występują problemy z uszczelnianiem połączenia próbka-uchwyt mocujący oraz w przypadku badań niszczących zalania stanowiska badawczego przez ciecz roboczą (np. olej, woda).

Monitorowanie stanu odkształcenia próbek rurowych zostało zrealizowane z wykorzystaniem tzw. światłowodowych siatek Bragga (ang. *Fiber Bragg Grating*, FBG). Czujniki te należą do grupy światłowodowych głowic pomiarowych z modulacją długości fali świetlnej. Charakteryzują się periodycznymi zmianami wartości współczynnika załamania (rys. 2a), występującymi wzdłuż osi rdzenia światłowodu jednomodowego, które powodują, iż część transmitowanego światłowodem promieniowania optycznego jest od nich odbijana, a pozostała część jest propagowana wzdłuż rdzenia światłowodu. Długość fali odbitej od światłowodowej siatki Bragga opisana jest zależnością [6]

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (1)$$

gdzie: λ_B - długość fali Bragga, n_{eff} - efektywny współczynnik załamania rdzenia światłowodu, Λ - stała siatki Bragga.



Rys. 2. Zasada działania światłowodowej siatki Bragga (a) oraz charakterystyka zmiany długości fali Bragga w funkcji odkształcenia czujnika (b) [7]

Fig. 2. Principle of the Fiber Bragg Grating sensor (a) and change of the Bragg wavelength as the function of strain (b) [7]

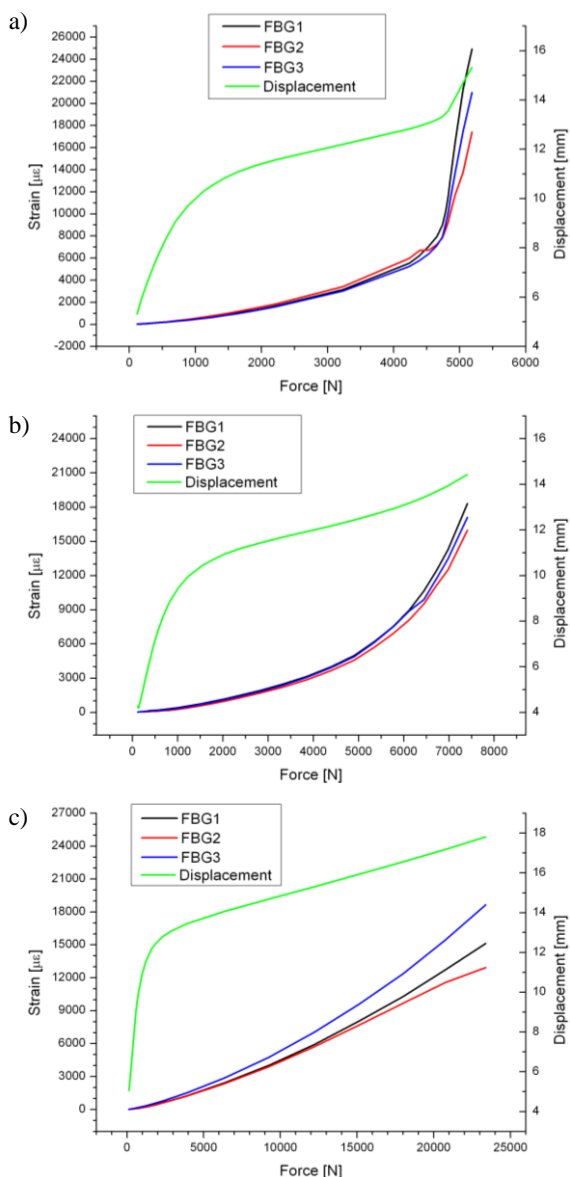
Czujniki FBG, naklejone na zewnętrznej powierzchni badanej konstrukcji (próbki) bądź też umiejscowienie wewnątrz materiału konstrukcyjnego, ulegają deformacjom, powodując zmianę długości fali Bragga, która stanowi miarę mierzonych odkształceń. Podkreślić należy jednak fakt, iż zmiana λ_B w rzeczywistych układach pomiarowych jest efektem równoczesnego wpływu temperatury i odkształceń, które to mogą być mierzone w zakresach odpowiednio: $-270 \div 800^\circ\text{C}$ oraz $-3 \div 3\%$. Przykładowa charakterystyka zmiany długości fali Bragga w funkcji odkształceń przedstawiona została na rysunku 2b [7].

WYNIKI BADAŃ

Badania przeprowadzone zostały dla trzech różnych rodzajów próbek, które były wykonane tą samą techniką (metoda splatania włókna szklanego, następnie nasączonego żywicą epoksydową), ale różniły się między sobą kątem ułożenia rowingu w matrycy. Wykonane zostały próbki o następujących geometriach (kątach ułożenia wzmocnienia): 30, 45 i 60°.

Przed rozpoczęciem badań na zewnętrznej powierzchni próbek rurowych zostały zainstalowane czujniki światłowodowe FBG. Na każdej z przebadanych próbek przyklejono po trzy siatki Bragga, tak aby możliwy był pomiar odkształceń w kierunku obwodowym, prostopadle do osi głównej próbki (rys. 1b). Szczegółowe wyniki pomiarowe uzyskane dla wybranej próbki o geometrii 30° zostały przedstawione na rysunku 3a. Uzyskane wykresy siła-przemieszczenie posiadały dwa charakterystyczne punkty przegięcia. W początkowym etapie obciążania próbki (do ok. 1,2 kN) widoczny jest dość gwałtowny wzrost wartości przemieszczeń tłoka ściskającego gumowe krążki, znajdujące się wewnątrz rurki. W tym czasie nastąpiło ułożenie gumowych krążków w próbce (m.in. wypchnięcie powietrza znajdującego się pomiędzy krążkami). Świadczą o tym m.in. małe odkształcenia rejestrowane przez czujniki FBG w funkcji zadanej siły. Później nastąpiło właściwe ściskanie gumy, powodujące powstanie jednoosiowego stanu naprężeń w materiale kompozytowym. Powyżej wartości siły wynoszącej ok. 4,75 kN zaobserwowano gwałtowny wzrost wartości rejestrowanych odkształceń obwodowych (drugi punkt przegięcia charakterystyki siła-przemieszczenie). Spowodowane było to uszkodzeniem matrycy w kompozycie. Wystąpiło tzw. efekt ścięcia na granicy faz, dla wspomnianej powyżej wartości siły zauważono w trakcie badań początek „zabielania” się próbki. Wielkość odkształceń obwodowych mierzonych w trzech różnych miejscach próbki dla siły 4,75 kN była zbliżona, a wartość średnia wynosiła ok. 8600 $\mu\epsilon$. Zarejestrowane przez czujniki FBG odkształcenia maksymalne dochodziły do 2,5% (25000 $\mu\epsilon$). Samo włókno szklane nie uległo uszkodzeniu (brak skoków na wykresie obciążania oraz brak wysokoamplitudowej emisji akustycznej w tej fazie obciążania), przeprowadzone niezależnie badania pokazały, iż całkowite zniszczenie (rozerwanie) podobnych

próbek następuje dla sił o wartościach rzędu 17÷20 kN [1].



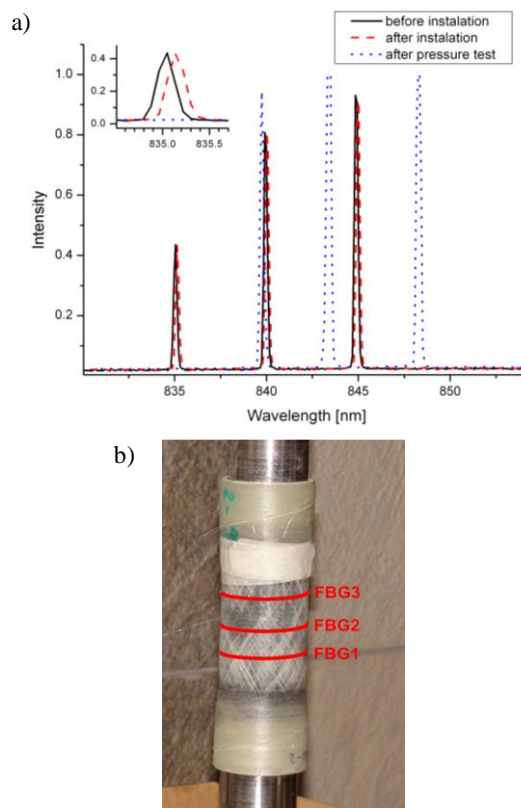
Rys. 3. Zmiana odkształceń obwodowych oraz przemieszczenie tłoka maszyny wytrzymałościowej w funkcji przyłożonej siły dla próbek o geometrii 30 (a), 45° (b) oraz 60° (c)

Fig. 3. Force - strain and force-displacement curves for specimens with reinforcement angles: 30° (a), 45° (b) and 60° (c)

Dla porównania na rysunkach 3b oraz 3c przedstawiono przykładowe wyniki z pomiarów odkształceń i przemieszczeń tłoka maszyny wytrzymałościowej dla próbek 45 i 60°. Badania przeprowadzone zostały tak, aby zakres mierzonych odkształceń był porównywalny dla pozostałych typów próbek. Dla próbki 45° i wartości siły rzędu 5,9 kN (przemieszczenie ~13 mm) widoczny jest charakterystyczny punkt przegięcia mierzonych charakterystyk siła-odkształcenie, związany zapoczątkowanym procesem degradacji matrycy epoksydowej.

Na wykresie z rysunku 3c siła-przemieszczenie widoczny jest tylko jeden punkt przegięcia, ponadto nie występuje gwałtowny wzrost rejestrowanych odkształceń

obwodowych. Pomimo znacznie większych wartości sił ściskających elastomerowe krążki (większe ciśnienie wewnątrz próbki) w badanej próbce nie uległa uszkodzeniu epoksydowa matryca, brak efektu ścięcia na granicy faz.



Rys. 4. Widmo odbiciowe pochodzące od trzech czujników FBG zainstalowanych na badanej próbce 30° (widoczne przesunięcie pików po badaniach świadczące o trwałym uszkodzeniu próbki) (a), a także widok badanej próbki w momencie jej zniszczenia (widoczne zabielenie matrycy) (b)

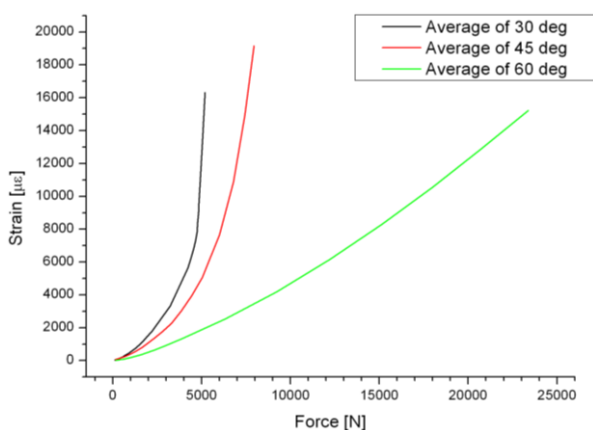
Fig. 4. A reflection spectrum for three FBG sensors from specimen 30° (it is possible to observe a shift of Bragg wavelengths which testify tube's permanent failure) (a) as well as view of damaged specimen (b)

Na rysunku 4a przedstawione zostało widmo odbiciowe naklejonych na badanej rurce 30° czujników FBG przed i po ich naklejeniu, a także po badaniach. Widoczne są trzy charakterystyczne piki, pochodzące od trzech siatek Bragga. Wartości początkowe fal Bragga wynosiły odpowiednio: 835, 840 oraz 845 nm. W trakcie procesu klejenia czujników na próbce autorzy pracy wprowadzili do nich niewielkie naprężenia wstępne. Na powiększeniu (rys. 4a) widoczne jest niewielkie przesunięcie fali Bragga rzędu 0,09 nm. Odpowiada to wstępnemu odkształceniu czujnika o 140 µε. Pozwala to uniknąć sytuacji, w której czujnik pracuje w tzw. strefie martwej, czyli rzeczywisty obiekt się odkształca, a zainstalowany czujnik tego nie rejestruje.

Widmo odbiciowe zarejestrowane po badaniach (przy zerowej wartości siły ściskającej gumowe krążki) jest znacząco przesunięte w stosunku do widma zarejestrowanego przed rozpoczęciem badań. Związane jest to

z trwałymi uszkodzeniami, które miały miejsce w strukturze materiału kompozytowego po przekroczeniu wartości krytycznej (ok. 4,8 kN). Wartość odkształceń trwałych (plastycznych) zarejestrowanych przez siatki Bragga wynosiła odpowiednio: 7200,5 $\mu\epsilon$ (FBG1), 5328 $\mu\epsilon$ (FBG2) oraz 5122,8 $\mu\epsilon$ (FBG3).

Na rysunku 5 przedstawiono zestawienie wartości średnich odkształceń obwodowych zmierzonych przy użyciu światłowodowych siatek Bragga dla trzech rodzajów próbek kompozytowych: 30, 45 i 60°. Dla próbek o największej wartości kąta ułożenia wzmocnienia (60°) zauważyć można, iż rejestrowane odkształcenia obwodowe są znacznie mniejsze niż dla pozostałych rodzajów próbek dla tej samej wartości przyłożonej siły (ciśnienia wewnętrznego). Oznacza to, iż obciążenie przenoszone jest w większej części przez wzmocnienie (włókna szklane) niż przez żywicę, co pozwala w znaczący sposób podnieść wartość wytrzymałości wykonanych elementów kompozytowych. Potwierdza to również tezę, że wzrost wytrzymałości w przypadku elementów rurowych poddanych działaniu ciśnienia wewnętrznego wzrasta wraz ze wzrostem kąta ułożenia wzmocnienia. Jest to spowodowane występowaniem, w przypadku tego rodzaju obciążeń, jedynie naprężeń obwodowych w rurze kompozytowej. Oczywiście optymalny kąt dla tego typu obciążenia jest zbliżony do 90°.



Rys. 5. Zestawienie wartości średnich odkształceń dla trzech rodzajów próbek kompozytowych: 30, 45 i 60° w funkcji obciążenia

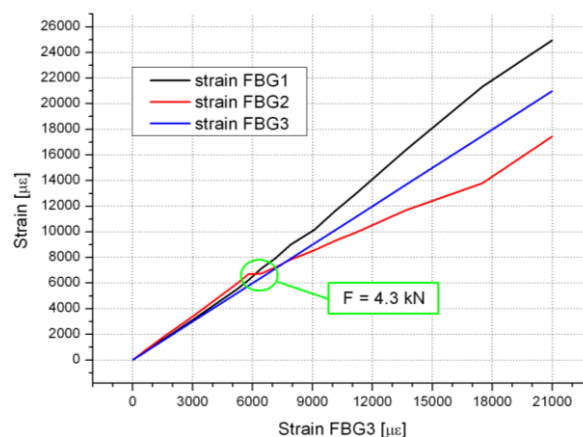
Fig. 5. An average values of circumferential strain for three different tube types: 30, 45 and 60° in a function of applied load

ANALIZA MAKROSKOPOWA

Badane próbki w skali makroskopowej można traktować jako próbki wykonane z materiału jednorodnego. Ponadto zakładając, że ciśnienie wewnętrzne (spowodowane ściskaniem elastomerowych krążków) jest takie samo w każdym miejscu, można przewidywać, iż mierzone w tym samym kierunku odkształcenia obwodowe będą miały takie same wartości. Ewentualne niewielkie rozbieżności wynikać mogą z lokalnych niedoskonałości materiału. W chwili gdy w materiale pojawi się defekt

(np. ścięcie na granicy faz), wówczas zależność pomiędzy odkształceniami mierzonymi w różnych punktach przestanie być liniowa.

Na rysunku 6 przedstawiona została zależność pomiędzy odkształceniami obwodowymi mierzonymi przez światłowodową siatkę Bragga FBG3 oraz odkształceniami zarejestrowanymi przez czujniki FBG1 oraz FBG2. Dodatkowo w celu porównania nałożono wyniki uzyskane z FBG3. Zauważyć można, iż w zakresie od 0 do ok. 6000 $\mu\epsilon$ (co odpowiada sile ściskającej elastomer $F = 4,3$ kN) charakterystyki są zbieżne i mają charakter liniowy. Powyżej wspomnianej wartości odkształceń zależność odkształceń z FBG2 w funkcji FBG3 przestaje być liniowa (zmienia się współczynnik kierunkowy prostej). Podobnie zachowuje się krzywa FBG1 w funkcji FBG3. Oznacza to, iż w strukturze materiału kompozytowego pojawiły się pierwsze uszkodzenia (defekty), zlokalizowane w okolicach czujnika FBG2. Na rysunku 4b przedstawiono zdjęcie próbki, dla której przeprowadzono opisywaną powyżej analizę. Wyraźnie widoczny jest na niej obszar (obejmujący FBG1 oraz FBG2), na którym nastąpiło zabielenie (zdefektowanie struktury matrycy epoksydowej).



Rys. 6. Analiza porównawcza odkształceń obwodowych próbki o strukturze 30°

Fig. 6. Comparison of circumferential strain for tube specimen 30°

PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki pomiarowe potwierdzają, iż czujniki światłowodowe mogą być z powodzeniem stosowane do pomiaru odkształceń kompozytowych elementów wykonanych metodą splatania. Pozwalają one na lokalny pomiar odkształceń z dużą dokładnością (~ 1 $\mu\epsilon$) w szerokim zakresie pomiarowym. Dzięki zastosowaniu światłowodowej techniki pomiarowej możliwe jest wyznaczenie dla próbek 30 i 45° momentu, w którym następuje efekt ścięcia na granicy faz (włókno szklane-żywica epoksydowa) sygnalizowany przez tzw. zabielenie próbki. Zastosowana technika pomiarowa umożliwia wcześniejsze wykrycie powstających w materiale defektów oraz ich kontrolę. Ponadto przeprowadzone badania potwierdziły, iż dla większych wartości kąta ułożenia wzmocnienia

w materiale kompozytowym możliwe jest przeniesienie większych wartości sił niszczących, stosownie do użytego obciążenia - jednoosiowy stan naprężenia w kierunku obwodowym. Największymi zaletami wymienionego sposobu badań w porównaniu do badań przy użyciu cieczy są: bezpieczeństwo, czystość stanowiska, bardzo krótki czas przygotowania próbki do badań oraz pewność uzyskanych wyników pomiarowych.

LITERATURA

- [1] Błażejowski W., Gasperowicz A., Gąsior P., Kaleta J., Kompozytowe zbiorniki dla CNG i wodoru, wymogi homologacyjne i metody badań, *Czas na Gaz* 2006, 19, XI-XII.
- [2] Soden P.D., Kitching R., Tse P.C., Tsavalas Y., Hinton M.J., Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound composite tubes subjected to uniaxial and biaxial loads, *Composites Science and Technology* 46, 363-378.
- [3] Peters S.T., *Handbook of Composites*, 2. ed., Chapman & Hall, London.
- [4] Hufenbach W., Böhm R., Kroll L., Czulak A., Braided composite pipe elements for applications in chemical apparatus engineering, 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15), Durban 27.6.-1.7.2005, auf CD-ROM.
- [5] Czulak A., Hufenbach W., Błażejowski W., Gąsior P., Badania porównawcze kompozytowych próbek rurowych, XXIII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka 2008.
- [6] Yu F., Yin S., *Fiber Optic Sensors*, Marcel Dekker, Inc., New York 2002.
- [7] Błażejowski W., Gąsior P., Kaleta J., Sankowska A., Optical fiber sensors integrated with composite material based constructions, *Proc. SPIE 6608 - Lightguides and Their Applications III*, 660802, 2007.