

Werner Hufenbach¹, Andrzej Czulak^{1*}, Wojciech Błażejowski², Paweł Gąsior²

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Dürerstraße 26, Dresden D-01062, Germany

² Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Poland

* Corresponding author. E-mail: acz@ilk.mw.tu-dresden.de

Otrzymano (Received) 09.03.2009

WYSOKOCIŚNIENIOWE ZBIORNIKI KOMPOZYTOWE WZMOCNIONE WYPLOTEM Z WŁÓKNA SZKLANEGO ZE ZINTEGROWANYMI CZUJNIKAMI ŚWIATŁOWODOWYMI

Przedstawiono metodykę wytwarzania prototypowych, wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych, wykonanych nowatorską - w odniesieniu do tego typu konstrukcji - techniką wyplatania włókna ciągłego. Wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach, takich jak: przemysł samochodowy, lotnictwo, służby ratownicze itp. Tak duża popularność zbiorników kompozytowych jest głównie związana ze znaczną redukcją masy tego typu konstrukcji w porównaniu do standardowych zbiorników stalowych, przy zapewnieniu odpowiednio wysokiej wytrzymałości mechanicznej. Ciekawym przykładem jest lekki, wysokowytrzymały zbiornik przeznaczony do gromadzenia sprężonych paliw (np. metan lub wodór), niezbędnych do zasilania ogniw paliwowych (głównie H₂) lub bezpośredniego spalania w samochodach, pojazdach specjalistycznych komunikacji miejskiej itp. Zastosowana innowacyjna technologia nakładania wzmocnienia z włókien szklanych w postaci wypłotu pozwoliła na zapewnienie powtarzalności wykonania oraz otrzymanie jakościowo dobrego materiału badawczego, przy porównywalnym czasie wytwarzania do metody nawijania.

Do rejestracji pola odkształceń badanych obiektów wykorzystano czujniki światłowodowe (ang. *Optical Fiber Sensors*, OFS), umożliwiające ciągle (tzw. on-line) bądź też okresowy monitoring ich stanu technicznego. W trakcie procesu wyplatania zbiorników pomiędzy ostatnimi warstwami wzmocnienia zainstalowane zostały dwa rodzaje czujników OFS. Zastosowano czujniki punktowe w postaci światłowodowych siatek Bragga (FBG) oraz światłowodowe czujniki interferometryczne o długich ramionach pomiarowych (SOFO). Dodatkowo zainstalowano referencyjne czujniki FBG na zewnętrznej powierzchni zbiornika.

Słowa kluczowe: wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe, kompozyty wyplatane, własności mechaniczne, badania wytrzymałościowe, GFRC (Glass Fiber Reinforced Composite), próbki rurowe, czujniki światłowodowe, FBG, SOFO

BRAIDED HIGH PRESSURE VESSELS WITH INTEGRATED OPTICAL SENSORS

In this paper, manufacture methodology of prototyping high-pressure composite vessel, manufactured with novel technique of braiding; according to this construction type is shown. High pressure composite vessels find broad application in many areas as: automotive industry, aeronautics, rescue services, etc. In comparison to standard steel vessels, composite vessels have many advantages. High mechanical strength and strong weight reduction make composite vessels popular in novel technologies. An interesting example is a lightweight, high pressure vessel destined to store compressed fuels like methane or hydrogen. These gases are necessary to supply the fuel cell (mainly H₂) or to direct burning in the cars, special mobiles and different equipments (ex. Stationary power generator etc.). But the novel high-pressure composite vessel needs a very efficient manufacturing process and precise monitoring system.

The novel braiding technology of glass fiber reinforcement structures has high potential to fabricate near-net-shaped fiber preforms of complex shaped composite vessels and allow to accelerate manufacturing process, ensuring the reproducibility and good quality of the specimens. The optical fiber sensors were used to register deformation areas, enabling their on-line or periodical technical monitoring. During braiding process, between last reinforcement layers, two types of optical fiber sensors were installed. Point sensors in form of Fiber Bragg Gratings as well as optical interferometrical sensors with long measurement arms (SOFO) were used. A FBG are novel optical sensors recorded within the core of the standard optical fiber. Additional optical fibre sensors in form of FBGs for reference measurement were installed on the outer surface of pressure vessel.

Keywords: high pressure composite vessels, braiding composites, mechanical properties, strength tests, GFRC (Glass Fiber Reinforced Composite), tube specimens, Optical fibre sensors, FBG, SOFO

WSTĘP

Dotychczas znanymi i stosowanymi metodami wytwarzania zbiorników kompozytowych wzmocnionych

włóknem ciągłym były techniki wykorzystujące proces nawijania rowingu na rdzeń lub liner. W przypad-

ku złożonych geometrii metoda nawijania wymaga dodatkowych nakładów związanych z pracą ręczną, ponieważ należy ona do półautomatycznych metod wytwarzania. Wiąże się to bezpośrednio z wydłużeniem czasu produkcji oraz wzrostem ceny produktu finalnego.

Zarówno lżejszą, jak również tańszą alternatywą w stosunku do tradycyjnych metali, tworzyw sztucznych oraz kompozytów wzmocnionych nawijanym włókiem szklanym staje się nowa grupa materiałów kompozytowych wzmocnionych wyplotem z włókien ciągłych. Ta jeszcze młoda grupa materiałowa oferuje oprócz ogromnego potencjału ekonomicznego bardzo dużą swobodę konstruowania, charakteryzującą się możliwością dopasowania ułożenia włókien do rodzaju i kierunku występującego obciążenia.

W ostatnich latach techniki wyplotu są nadal intensywnie rozwijane, a pełna automatyzacja procesu wytwórczego pozwala zredukować koszty w stosunku do alternatywnych sposobów wytwarzania. W przypadku metody wyplatania, dzięki zastosowaniu ram wyplatających zintegrowanych z wieloosiowymi manipulatorami, możliwe jest wykonanie zbiorników ciśnieniowych nawet o średnicy linera wynoszącej do 5000 mm oraz posiadających niesymetrycznie umieszczone króćce bez udziału pracy ręcznej.

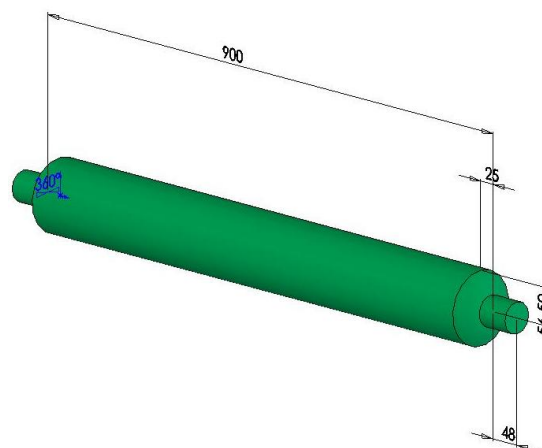
Jednak na podstawie wyróżnionych właściwości wytrzymałościowych oraz wymaganej odporności na działanie substancji chemicznych i takie rozwiązanie posiada również wady, ponieważ nieosłonięty materiał kompozytowy podatny jest na uszkodzenia. Z tego względu najbardziej odpowiednie wydaje się zastosowanie materiału hybrydowego pozwalającego wykorzystać wszystkie zalety oraz ograniczyć wady materiałów składowych. Odporność korozyjną oraz szczelność powinien zapewnić liner, na którym w automatycznym procesie produkcyjnym winna zostać naniesiona powłoka zewnętrzna zapewniająca założone własności wytrzymałościowe.

PROCES WYPLATANIA

Zbiorniki zostały wykonane za pomocą metody wyplatania włókien szklanych na wcześniej przygotowanych rdzeniach (linerach) z cienkiej blachy stalowej. Wymiary linera przedstawiono na rysunku 1.

Metoda wyplatania jest prostym, a zarazem bardzo efektywnym procesem, służącym do wytwarzania zamkniętych profili półfabrykatów bądź gotowych produktów z włókien ciągłych. Główną zaletą procesu wyplatania w porównaniu do produktów wzmocnionych jednokierunkowo bądź laminowanych jest zdolność dostosowania się do nietypowych kształtów rdzeni oraz zachowanie ciągłości włókien podczas zmiany średnicy rdzenia. To pozwala na wykonanie wszelkich profili zamkniętych o konturach wypukłych, a w przypadku wyplatania trójosiowego możliwe jest wykonanie elementów o przekrojach niejedno-

rodnych, gdzie proces przebiega równocześnie w trzech płaszczyznach [1].



Rys. 1. Schemat zastosowanego linera wraz z wymiarami

Fig. 1. Scheme of used liner

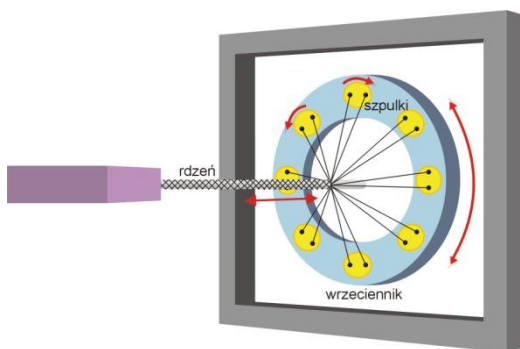
Ważną zaletą wyplatania jest szybkość oraz pełna automatyzacja procesu, w którym koszty robocizny związanej z układaniem włókien są minimalne, a preformy wytwarzane są dokładnie i szybko. Odkąd robocizna obejmuje od 60 do 80% kosztów całkowitych większości wytwarzanych elementów kompozytowych, ich redukcja dzięki zastosowaniu metody wyplatania pozwala obniżyć w znaczny sposób cenę gotowego wyrobu [2].

Kolejną zaletą tej metody jest wykorzystanie włókien suchych, dzięki którym zbędne jest użycie „prepregów” podwajających cenę produkcji. Niskie koszty robocizny, a także stosowanych materiałów predestynują tę metodę do wykonywania elementów kompozytowych wzmocnionych włóknami ciągłymi szczególnie w przypadku profili zamkniętych o przekroju kołowym, takich jak rury, kształtki oraz zbiorniki ciśnieniowe.

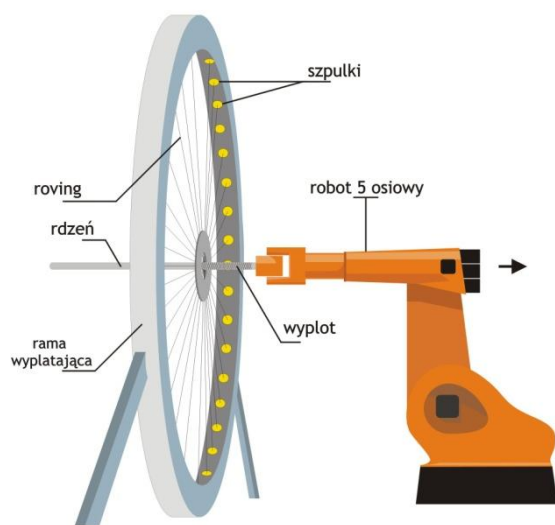
W procesie wyplatania zbiorników wykorzystywano 5-osiowego robota firmy KUKA oraz ramę wyplatającą firmy HERZOG 288-1, mającą 96 szpułek poruszających się po jej wewnętrznej stronie z pełni kontrolowalną prędkością. Kąt ułożenia włókien zależy zarówno od średnicy i szybkości posuwu rdzenia, jak również od prędkości obwodowej poruszających się szpułek. Możliwości manipulacyjne robota pozwalają dodatkowo na oplot elementów niesymetrycznych oraz zmianę kąta wyplotu w trakcie trwania procesu. Na rysunku 2 przedstawiono schemat procesu wyplatania preformy, natomiast na rysunku 3 schemat ramy wyplatającej wraz z manipulatorem.

Proces wyplatania na rdzeniu stalowym przebiegał w następujących krokach:

- 1) przygotowanie rdzenia stalowego,
- 2) opracowanie programu sterującego manipulatorem oraz ramą wyplatającą (dobór prędkości posuwu rdzenia oraz poruszania się (szpułek),
- 3) wyplotenie 8 warstw wzmocnienia o kącie 54°.



Rys. 2. Schemat procesu wyplatania preformy
Fig. 2. Scheme of braiding process



Rys. 3. Schemat ramy wyplatającej wraz z manipulatorem
Fig. 3. Scheme of high-speed radial braiding machine

W procesie wykorzystano włókna szklane EC1200-315 firmy Oschatz o średnicy włókna 17 μm i wytrzymałości na rozciąganie 3400 N/mm^2 oraz module Younga 73,000 N/mm^2 . Optymalny kąt wyplotu wybrano na podstawie analizy literaturowej dostępnej z zakresu nawijania [3] oraz z przeprowadzonych symulacji wytrzymałościowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Grubość naniesionych warstw wynosiła średnio ok. 4 mm, co pozwala wnioskować, że grubość jednej warstwy wynosi ok. 0,5 mm.

Dzięki pełnej automatyzacji procesu udało się uzyskać powtarzalne jakościowo warstwy wzmocnienia, charakteryzujące się jednorodnym, poprawnie ułożonym wzorem wyplotu, oraz zredukowano czas wyplotu jednej warstwy wzmocnienia do 7 minut.

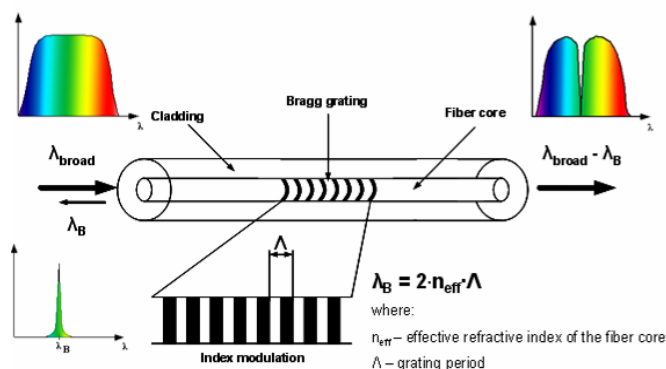
WYTWARZANIE ZBIORNIKÓW PRÓBNYCH Z CZUJNIKAMI

W trakcie procesu wyplatania zbiorników pomiędzy warstwami 7 i 8 zainstalowane zostały dwa rodzaje czujników światłowodowych, przeznaczonych do pomiarów odkształceń. Zastosowano czujniki punkto-

we w postaci światłowodowych siatek Bragga (FBG) oraz światłowodowe czujniki interferometryczne o długich ramionach pomiarowych (SOFO).

Światłowodowe siatki Bragga (Fiber Bragg Grating, FBG) są najczęściej spotykanym przykładem czujników z tzw. modulacją długości fali świetlnej, stosowanych w pomiarach odkształceń i temperatury. Dzięki swoim niewielkim wymiarom (w porównaniu do dużych obiektów) są to typowe przetworniki punktowe. Długość pojedynczej siatki mieści się w granicach 5÷10 mm. Dzięki doskonałym możliwościom multipleksacji możliwe jest łączenie wielu FBG w sieć czujników, tworząc systemy pomiarowe, tzw. pseudo-rozproszone. Światłowodowa siatka Bragga jest strukturą wytworzoną w rdzeniu jednomodowego włókna światłowodowego (rys. 4), charakteryzującą się periodycznymi zmianami wartości współczynnika załamania [4].

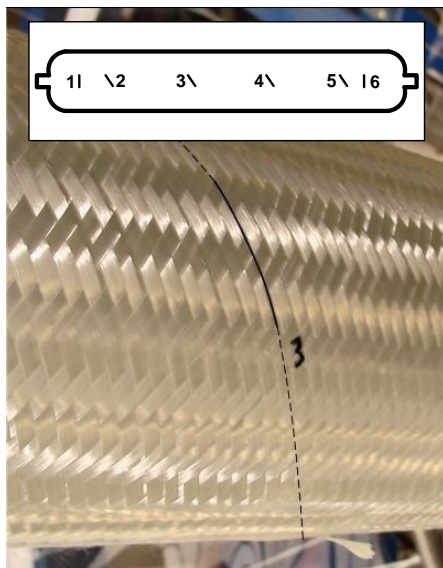
Występowanie tak modulowanej struktury wewnątrz rdzenia światłowodu powoduje, iż część transmitowanego światłowodem promieniowania optycznego jest odbijana od struktury siatki, a pozostała jego część jest propagowana bez strat. Długość fali odbitej od siatki Bragga, tzw. fala Bragga (λ_B), jest opisana zależnością $\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda$ (n_{eff} - efektywny współczynnik załamania rdzenia światłowodu, Λ - stała siatki Bragga) [4].



Rys. 4. Schemat zasady działania światłowodowych siatek Bragga
Fig. 4. Principle of the fiber Bragg grating sensor

Naklejone na zewnętrznej powierzchni badanej konstrukcji czujniki ulegają deformacjom, powodując zmianę długości fali Bragga, która stanowi miarę mierzonych odkształceń. Podkreślić należy jednak, iż zmiana λ_B w rzeczywistych układach pomiarowych jest efektem równoczesnego wpływu temperatury i odkształceń [5], które to mogą być mierzone w zakresach odpowiednio: -270÷800°C oraz -3÷ 3%.

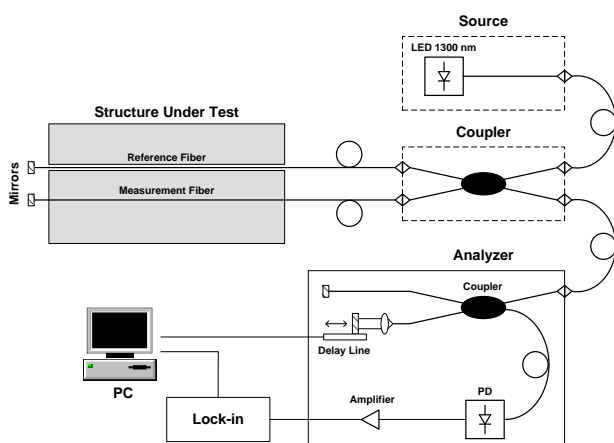
W wyplatanych zbiornikach czujniki FBG zainstalowane zostały w taki sposób, aby umożliwić pomiary odkształceń w kierunku obwodowym: prostopadle do osi głównej zbiornika (FBG1 oraz FBG6) oraz zgodnie z kierunkiem ułożenia rowingu szklanego (FBG2 ÷ FBG5). Rozmieszczenie czujników na zbiorniku oraz widok utkanej struktury z zainstalowaną siatką Bragga przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat rozmieszczenia czujników FBG oraz widok utkanej struktury z zainstalowanym czujnikiem FBG3

Fig. 5. Displacement of the optical fiber sensors on the vessel and a view of braided composite structure with installed FBG3 sensor

Interferometryczne czujniki światłowodowe (SOFO) 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. „zatonione” w betonie). Czujniki te przeznaczone są do pomiaru przemieszczenia (odkształcenia). Idea pomiaru polega na analizowaniu różnicy faz sygnałów optycznych rozchodzących się w dwóch ramionach interferometru Michelsona - pomiarowym oraz odniesienia (rys. 6).



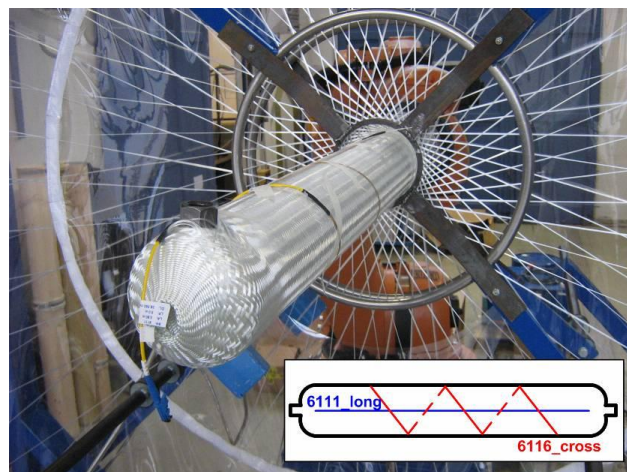
Rys. 6. Schemat układu pomiarowego z podwójnym interferometrem Michelsona [7]

Fig. 6. Low-coherence double Michelson interferometer [7]

Ramię pomiarowe jest w bezpośrednim kontakcie z badaną konstrukcją (może być np. przyklejone [6]),

natomiast ramię odniesienia jest odseparowane mechanicznie od monitorowanego obiektu, ale jest wystarczająco blisko, by temperatura obu ramion była jednakowa. Pozwala to wyeliminować wpływ fluktuacji temperatury na wyniki pomiarów. Pojawiająca się zmiana fazy fali świetlnej jest wynikiem zmiany długości światłowodu, stanowiącego głowicę pomiarową. W wyniku interferencji obydwu wiązek możliwe jest poprzez analizę prążków interferencyjnych ilościowe określenie odkształcenia czujnika, a tym samym monitorowanej konstrukcji. Czujniki interferometryczne należą do grupy czujników o długich ramionach pomiarowych, a więc mierzone deformacje są wartością średnią dla całej długości czujnika.

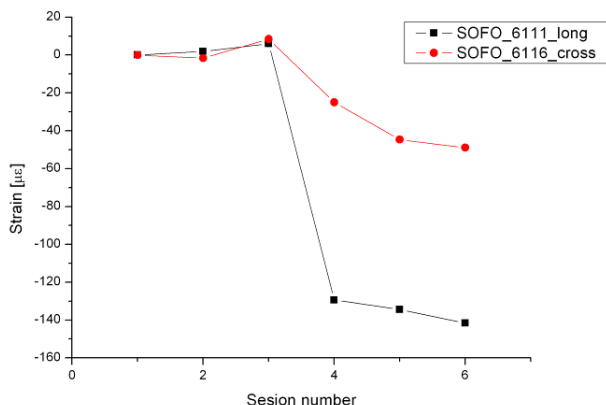
W trakcie wyplatania jednego ze zbiorników pomiędzy dwiema ostatnimi warstwami zainstalowano dwa światłowodowe czujniki interferometryczne (tzw. SOFO SMARTape® firmy Smartec). Każdy z nich miał długość 80 cm. Jeden z nich umożliwił pomiary odkształceń w kierunku wzdłużnym (ozn. SOFO_6111_long), a drugi w kierunku obwodowym (ozn. SOFO_6116_cross). Czujniki te mają postać kompozytowych taśm wykonanych z włókna szklanego z zatopionym wewnątrz światłowodem. Sposób ich rozmieszczenia przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia czujników SOFO SMARTape® oraz widok zbiornika w trakcie wyplatania z zainstalowanymi na warstwie nr 7 czujnikami

Fig. 7. Displacement of the SOFO SMARTape sensors as well as a view of the vessel and sensors installed on the layer no. 7 during braiding process

Ponieważ zastosowane zostały czujniki, które w trakcie procesu produkcji są już wstępnie naprężone, możliwy stał się pomiar zmiany odkształceń w strukturze kompozytu w trakcie jego wyplatania. Na rysunku 8 pokazano zmiany odkształceń wzdłużnych i obwodowych przed (sesje pomiarowe: 1÷3) oraz po procesie wyplatania zbiornika z czujnikami (sesje: 4÷6). Można zauważyć, iż obydwie czujniki (obwodowy i wzdłużny) zostały w trakcie procesu wyplatania ściskane, a zarejestrowane zmiany odkształceń były równe odpowiednio $-141 \mu\epsilon$ oraz $-49 \mu\epsilon$.

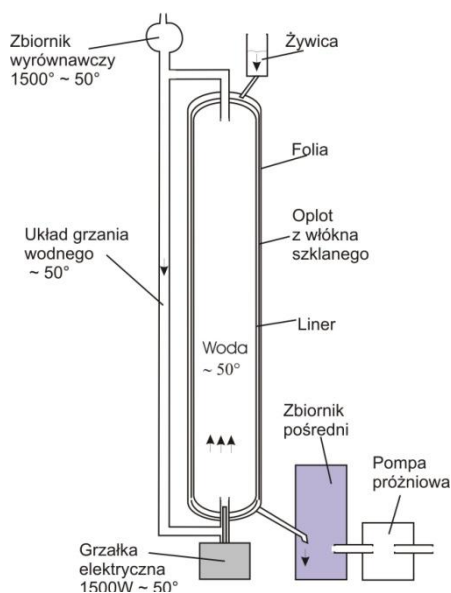


Rys. 8. Zmiany odkształceń wzdluznych i obwodowych przed oraz po procesie wyplatania zbiornika z czujnikami interferometrycznymi

Fig. 8. Longitudinal and circumferential strains in composite layer measured by interferometric SOFO sensors before and after braiding process

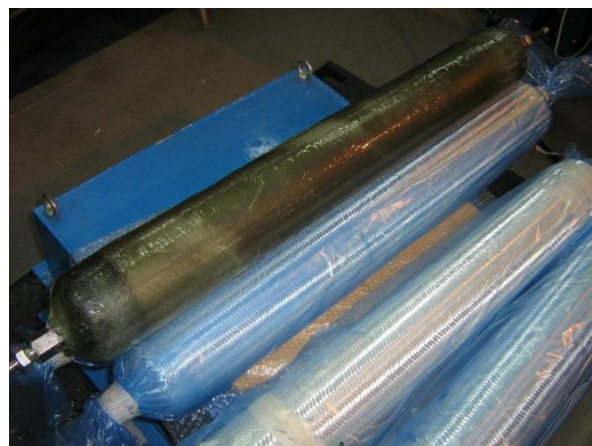
PROCES INFILTRACJI

W procesie infiltracji wykorzystano żywicę epoksydową o oznaczeniu Epolam 5015 oraz utwardzacz Epolam 2016 firmy AXSON. Zbiornik umieszczono w szczelnie zamkniętym worku, do którego podłączono zbiornik z żywicą epoksydową i pompę próżniową. W celu utrzymania temperatury powyżej 40°C układ zintegrowano z obiegiem wodnego grzania składającego się z grzałki elektrycznej o mocy 1500 W, podgrzewającej wodę do temperatury 50°C (rys. 9).



Rys. 9. Schemat procesu infiltracji zbiorników wysokociśnieniowych
Fig. 9. Scheme of infiltration process

Czas infiltracji wynosił ok. 1,5 h, natomiast utwardzania 24 godziny w 21°C oraz dodatkowo 24 godziny w 80°C, a przeinfiltrowany zbiornik wysokociśnieniowy oraz pozostałe zbiorniki przygotowane do procesu infiltracji przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Zbiorniki wysokociśnieniowe

Fig. 10. High pressure vessels

PODSUMOWANIE

Zaproponowana nowoczesna metoda wytwarzania prototypowych, wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych pozwoliła na wykonanie dobrego jakościowo materiału badawczego. Otrzymane zbiorniki charakteryzowały się gładką powierzchnią zewnętrzną, brakiem widocznych nieciągłości oraz zwartą strukturą zbrojenia wyplatane. Zastosowanie ramy wyplatającej pozwoliło na zintegrowanie w czasie trwania procesu wyplatania światłowodowych siatek Bragga, a także interferometrycznych czujników światłowodowych, które umożliwiają ciągłą analizę stanu naprężeń występujących w zaproponowanych zbiornikach ciśnieniowych. Kolejnym krokiem będzie przeprowadzenie i weryfikacja analizy wytrzymałościowej oraz porównanie własności mechanicznych zbiorników ciśnieniowych zbrojonych wyplataniem włókna szklanego ze zbiornikami zbrojonymi z nawijanym włókna szklanego.

LITERATURA

- [1] Peters S.T., Handbook of Composites, 2. ed., Chapman & Hall, London.
- [2] Sharpless G.C., Triaxial Braiding, Composites manufacturing, October 2005.
- [3] Czulak A., Hufenbach W., Błażejowski W., Gasior P., Badania porównawcze kompozytowych próbek rurowych, XXIII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka 2008.
- [4] Yu F., Yin S., Fiber Optic Sensors, Marcel Dekker, Inc., New York 2002.
- [5] Błażejowski W., Gasior P., Kaleta J., Sankowska A., Optical fiber sensors integrated with composite material based constructions, Proc. SPIE 6608 - Lightguides and Their Applications III, 660802, 2007.
- [6] Glisic B., Inaudi D., Health monitoring of a full composite CNG tanks using long-gage fiber optic sensors, 11th SPIE's Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Vol. 5384-7, March 14-18, 2004, San Diego.
- [7] Inaudi D. i in., Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil engineering structures, Sensors and Actuators 1994, A 44, 125-130.

