

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
INSTYTUT MATERIAŁOZNAWSTWA I MECHANIKI TECHNICZNEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

**METODA MONITOROWANIA
WYSOKOCIŚNIENIOWYCH ZBIORNIKÓW
KOMPOZYTOWYCH NA PALIWA GAZOWE
Z WYKORZYSTANIEM POMIARÓW ODKSZTAŁCEŃ
CZUJNIKAMI ŚWIATŁOWODOWYMI**

mgr inż. Paweł Gąsior

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Kaleta, prof. nadzw. PWr.

Wrocław 2012

Żonie oraz Synkowi

Streszczenie

Głównym celem przyjętym w pracy było stworzenie - zintegrowanego z obiektem - systemu monitorującego (ang.: Structural Health Monitoring – SHM) stan odkształcenia wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego, przeznaczonego do gromadzenia sprężonych paliw gazowych (metan, wodór). Do budowy systemu użyto kilku typów czujników światłowodowych.

Założono, iż system powinien zapewniać ciągły i niezawodny monitoring konstrukcji w trakcie jej długoletniej eksploatacji oraz umożliwiać oszacowanie stopnia degradacji kompozytowej powłoki nośnej zbiornika, a tym samym określić czas bezpiecznej eksploatacji. Za istotne uznano też wykazanie przydatności układu do kontroli technologii wytwarzania zbiorników oraz spełnienia wymagań zawartych w normach certyfikujących zbiorniki. Równolegle przyjęto, iż system pomiarowy powinien być przydatny w badaniach materiałów (kompozytów) stosowanych w budowie zbiorników. Celem poznawczym pracy była identyfikacja stanu odkształcenia ekstremalnie obciążonych wysokociśnieniowych konstrukcji kompozytowych.

Obiektem badań było szerokie spektrum komercyjnych i prototypowych, samodzielnie wytworzonych zbiorników do ciśnieniowego gromadzenia metanu (CNG) i wodoru (CH₂), o nominalnych ciśnieniach pracy odpowiednio: 200 i 700 barów oraz różne odmiany kompozytu w formie próbek rurowych i pierścieniowych typu NOL.

Dokonano przeglądu stanu wiedzy z zakresu metod badawczych z wykorzystaniem różnorodnych czujników światłowodowych. Przeprowadzono też krytyczną analizę literatury przedmiotu w obszarze systemów monitorujących butle kompozytowe oraz inne obiekty wykonane z materiałów kompozytowych, w tym z zastosowaniem czujników tensometrycznych i światłowodowych. Pozwoliło to łącznie na sformułowanie programu badań własnych.

Przyjęto, iż osiągnięcie celów pracy, wymagało zastosowania metod pomiarowych, bazujących na czujnikach światłowodowych, ze szczególnym uwzględnieniem światłowodowych siatek Bragga (FBG) oraz czujników interferometrycznych typu SOFO®. Przetworniki te umożliwiły integrację z monitorowanym obiektem (możliwość wbudowania głowicy pomiarowej w strukturę materiału kompozytowego bez wpływu na jego własności mechaniczne), a ponadto charakteryzowały się wysoką czułością pomiarową, przy równoczesnym szerokim zakresem pomiarowym, odpornością na zakłócenia elektromagnetyczne, a przede wszystkim iskrobezpieczeństwem.

Przeprowadzono następnie badania własne na próbkach kompozytowych (typu rurowego oraz NOL), z wykorzystaniem światłowodowego SHM, zarówno w warunkach obciąż-

żeń statycznych jak i badań na pełzanie. Wykazano pełną przydatność zaproponowanych systemów pomiarowych w pomiarach odkształceń o wartościach rzędu 3%, a także wyznaczania momentu ścinania na granicy faz (włókno wzmocnienia – matryca). Wybrane wyniki eksperymentalne porównano z rezultatami modelowania numerycznego. Sprawdzono możliwość kalibracji optycznego układu pomiarowego przez równoczesną rejestrację sygnałów emisji akustycznej, co umożliwiło rejestrację procesu kumulacji uszkodzenia struktury kompozytowej, poddanej ciągłemu obciążeniu.

Zbiorniki kompozytowe poddano obciążeniom quasistatycznym, cyklicznym i udarowym, zgodnie z obowiązującymi normami. Badano zbiorniki nowowytworzone jak i poddane na wstępie programowanym uszkodzeniom (nacięcia, delaminacja). Butle wytworzono technologią nawijania (ang.: winding) jak i wyplatania (ang.: braiding). We wszystkich przypadkach przetestowano możliwości SHM z użyciem czujników światłowodowych. Podjęto próbę identyfikacji procesu kumulacji uszkodzeń kompozytowego zbiornika poprzez pomiar lokalnych zmian odkształceń. Dodatkowo przeprowadzono badania, które umożliwiły porównanie światłowodowych systemów pomiarowych o różnych długościach głowic pomiarowych i wskazano rozwiązania najkorzystniejsze.

Metodą wyplotu włókna długiego wykonano prototypowe zbiorniki wysokociśnieniowe ze zintegrowanymi w strukturze nośnej czujnikami światłowodowymi typu FBG oraz SO-FO®. Ich aplikacja bezpośrednio w trakcie procesu produkcyjnego pozwoliła na ciągłą analizę stanu odkształcenia konstrukcji, zarówno na etapie wytwarzania (wyplatanie, infiltracja, utwardzanie), jak również w trakcie badań laboratoryjnych.

Wskazano także na główne problemy związane z modelowaniem numerycznym zbiorników kompozytowych oraz omówiono wybrane przykłady badań w tym obszarze.

Dodatkowo zaprezentowano przykłady innych laboratoryjnych aplikacji systemów SHM, bazujących na czujnikach światłowodowych, m.in. do monitorowania: zawieszenia samochodu sportowego typu Formuła Student, kompozytowych izolatorów wysokonapięciowych, materiałów o gigantycznej magnetostrykcji (kompozyt magnetoreologiczny typu SMART) oraz kompozytowych pultrud stosowanych jako wzmocnienia w stalowych i betonowych konstrukcjach budowlanych.

Przedstawiono także przykłady własnych badań w zakresie zastosowania światłowodowego SHM w obszarze energetyki cieplnej (monitoring zawiesznień oraz ścian komory paleniskowej kotła fluidalnego oraz kompozytowych rurociągów instalacji odsiarczania spalin).

Rezultaty uzyskane w rozprawie zebrano w formie wniosków i uwag końcowych. Dorobek naukowy opublikowano w ponad pięćdziesięciu pracach (artykuły w czasopiśmie, prace konferencyjne, raporty), których autorem lub współautorem jest doktorant.

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

ABS	– współczynnik podatności zbiornika na odkształcenie pod wpływem ciśnienia wewnętrznego
c	– prędkość światła w próżni
CFRC	– kompozyt węglowo-epoksydowy (ang.: Carbon Fiber Reinforced Composite)
CH ₂	– sprężony wodór (ang.: Compressed Hydrogen)
CNC	– maszyna sterowana numerycznie (ang.: Computerized Numerical Control)
CNG	– sprężony metan (ang.: Compressed Natural Gas)
EA	– emisja akustyczna
f_b	– przesunięcie częstotliwości wymuszonego rozpraszania Brillouina
FBG	– światłowodowa siatka Bragga (ang.: Fiber Bragg Grating)
FEM	– metoda elementów skończonych (ang.: Finite Element Method)
FPI	– interferometr Fabry – Perot (ang.: Fabry – Perot Interferometer)
GFRC	– kompozyt szklano-epoksydowy (ang.: Glass Fiber Reinforced Composite)
GMM	– materiały o gigantycznej magnetostrykcji (ang.: Giant Magnetostrictive Materials)
h	– stała Plancka
K_ε	– czułość odkształceniowa
K_T	– czułość temperaturowa
LED	– dioda elektroluminescencyjna (ang.: Light-Emitting Diode)
n_{eff}	– efektywny współczynnik załamania rdzenia światłowodu
n_g	– grupowy współczynnik załamania
NOL	– ang.: Naval Ordnance Laboratory
NWP	– nominalne ciśnienie pracy (ang.: Nominal Working Pressure)
OFS	– czujnik światłowodowy (ang.: Optical Fiber Sensor)
OTDR	– reflektometr optyczny (ang.: Optical Time Domain Reflectometry)
p_{ij}	– tensor wydłużeniowo – optyczny
PRD	– zawór bezpieczeństwa (ang.: Pressure Relief Device)
RVE	– komórka reprezentatywna (ang.: Representative Volume Element)
SBS	– wymuszone rozpraszanie Brillouina (ang.: Stimulated Brillouin Backscattering)
SHM	– monitoring strukturalny konstrukcji (ang.: Structural Health Monitoring)
SMM	– materiały magnetyczne typu SMART (ang.: Smart Magnetic Materials)
SOFO	– niskokoherentny interferometr światłowodowy (fr: Surveillance d'Ouvrage par Fibres Optiques)
SPU	– jednostka pomiarowo-odczytowa (ang.: Signal Processing Unit)
STEB	– standardowy zbiornik testowy (ang.: Standard Testing and Evaluation Bottle)
V_a	– prędkość fali akustycznej w światłowodzie

α	– tłumienie głowicy mikrougięciowej
Λ	– okres (stała) siatki Bragga
λ	– długość fali
λ_{as}	– długość fali anty-Stokesa
λ_B	– długość fali Bragga (ang.: Bragg wavelength)
λ_s	– długość fali Stokesa
ν	– współczynnik Poisson'a
$\mu\epsilon$	– mikrostrain (10^{-6})

Spis treści

Streszczenie	3
Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	5
1 Wprowadzenie i cel pracy	11
1.1 Wysokociśnieniowe zbiorniki do gromadzenia sprężonych paliw gazowych. Znaczenie naukowe i gospodarcze tematyki	11
1.2 Monitorowanie wysokociśnieniowych konstrukcji z wykorzystaniem czujników światłowodowych	12
1.3 Teza, cel pracy i działania o znaczeniu kluczowym	17
2 Systemy pomiarowe oparte na czujnikach światłowodowych	21
2.1 Wprowadzenie – definicja czujnika światłowodowego	21
2.2 Podstawowe zastosowania czujników światłowodowych w monitorowaniu obiektów technicznych	22
2.3 Klasyfikacja czujników światłowodowych	24
2.3.1 Czujniki z modulacją długości fali świetlnej	27
2.3.2 Czujniki z modulacją fazy fali świetlnej	30
2.3.3 Czujniki z modulacją amplitudy fali świetlnej	34
2.3.4 Czujniki rozłożone	37
2.4 Korzyści wynikające z monitorowania konstrukcji	41
2.5 Zestawienie systemów pomiarowych	43
2.6 Zastosowania czujników światłowodowych do monitorowania stanu technicznego wybranych konstrukcji	45
2.6.1 Monitorowanie budynków	46
2.6.2 Monitorowanie mostów	49
2.6.3 Monitorowanie zapór i innych obiektów hydrotechnicznych	51
2.6.4 Monitorowanie rurociągów	54
3 Zastosowania czujników światłowodowych w pomiarach wybranych elementów i konstrukcji kompozytowych	58
3.1 Wzmacniające laminaty i pultrudy kompozytowe	60
3.2 Elementy konstrukcji lotniczych	67
3.3 Zbiorniki ciśnieniowe	71
3.4 Kompozytowe elementy magnetyczne typu SMART	78

3.5 Rurociąg kompozytowy	79
4 Badania próbek kompozytowych; wybrane przykłady	82
4.1 Próbki rurowe wykonane metodą wyplotu	82
4.2 Badania próbek rurowych wykonanych metodą wyplotu	84
4.2.1 Wyniki badań statycznych	84
4.2.2 Analiza makroskopowa rurowych próbek wykonanych metodą wyplatania	88
4.2.3 Podsumowanie badań wyplatanych próbek rurowych	89
4.3 Badania próbek rurowych wykonanych metodą nawijania	90
4.3.1 Wyniki badań statycznych	90
4.3.2 Symulacje numeryczne nawijanej próbki rurowej	91
4.3.3 Porównanie wyników eksperymentalnych i symulacyjnych	92
4.3.4 Podsumowanie badań nawijanych próbek rurowych	93
4.4 Badania próbek kompozytowych z programowanymi defektami	93
4.4.1 Opis przeprowadzonych badań	94
4.4.2 Wyniki eksperymentalne	95
4.4.3 Wyniki symulacji numerycznych	96
4.5 Badania próbek typu NOL	98
4.5.1 Opis próbek i badania wstępne	98
4.5.2 Wyniki badań wstępnych	100
4.5.3 Badania quasi-statyczne	102
4.5.4 Badania na pełzanie	106
5 Badania wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych do gromadzenia sprężonych paliw	111
5.1 Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe	112
5.1.1 Budowa i rodzaje	112
5.1.2 Zastosowanie, zalety, wymagania	116
5.2 Metodyka badań dla kompozytowych butli wysokociśnieniowych	119
5.2.1 Badania cykliczne w temperaturze pokojowej	121
5.2.2 Statyczna próba na rozrywanie	123
5.3 Koncepcja systemu monitorowania zbiorników wysokociśnieniowych	124
5.4 Badania eksperymentalne zbiorników wysokociśnieniowych	126
5.4.1 Badania cykliczne zbiornika wysokociśnieniowego	126
5.4.2 Badania statyczne zbiornika wysokociśnieniowego	133
5.5 Badania statyczne i cykliczne zbiorników z programowanymi defektami	136

5.5.1	Defekty programowane – nacięcia	136
5.5.2	Defekty programowane – delaminacje	137
5.5.3	Badania statyczne zbiorników z defektami programowanymi	138
5.5.4	Badania cykliczne zbiorników z defektami programowanymi	154
5.5.5	Wyznaczenie pola odkształceń zbiorników z defektami programowanymi przez różne czujniki światłowodowe	160
6	Zbiorniki wykonane metodą wplotu włókna długiego z wbudowanymi czujnikami światłowodowymi	168
6.1	Opis metody wyplatania zbiorników z czujnikami światłowodowymi	168
6.1.1	Proces wyplatania	169
6.1.2	Proces infiltracji (przesycania)	171
6.1.3	Ocena makroskopowa kompozytu wyplatanego	173
6.2	Wytwarzanie zbiorników ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi	174
6.2.1	Monitorowanie procesu wyplatania zbiorników kompozytowych	175
6.2.2	Monitorowanie procesu infiltracji	178
6.2.3	Monitorowanie procesu utwardzania żywicy	179
6.3	Badania quasi-statyczne zbiorników wyplatanych	182
6.4	Wybrane problemy eksperymentalne – podsumowanie i sugestie w zakresie dalszych badań	187
7	Aspekty modelowania kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych	189
7.1	Wprowadzenie	189
7.2	Projektowanie i modelowanie geometrii zbiornika oraz struktur nawijanych	190
7.3	Modelowanie właściwości mechanicznych kompozytu w różnych skalach długości metodą homogenizacji. Obciążenia quasistatyczne.	191
7.4	Modelowanie kumulacji uszkodzenia kompozytu z użyciem automatów komórkowych i geometrii fraktalnej	193
7.5	Uwagi końcowe	196
8	Wnioski i uwagi końcowe	197
9	Bibliografia	202
	Spis ilustracji	217
	Spis tabel	227
	Załącznik – Inne aplikacje czujników światłowodowych	228
I.	System SHM dla kotła energetycznego w Elektrowni Siersza	228
II.	Monitorowanie rurociągów absorbera w instalacji odsiarczania spalin w Elektrowni Bełchatów	231

III. System do monitorowania w trybie „on-line” zawieszenia samochodu typu Formuła Student	233
IV. Pomiary kompozytowych izolatorów wysokonapięciowych	235
Summary	237
List of figures	240
List of tables	249
Kurzfassung	250
Резюме	253
Podziękowania	256

1 Wprowadzenie i cel pracy

1.1 Wysokociśnieniowe zbiorniki do gromadzenia sprężonych paliw gazowych. Znaczenie naukowe i gospodarcze tematyki

Wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe znajdują obecnie coraz szersze zastosowanie w wielu dziedzinach takich jak: przemysł samochodowy, lotnictwo, służby ratownicze, itp. Tak duża popularność zbiorników kompozytowych jest głównie związana ze znaczną redukcją ich masy, w porównaniu do zbiorników stalowych, przy zapewnieniu odpowiednio wysokiej wytrzymałości mechanicznej [1].

Zbiorniki kompozytowe do przechowywania sprężonych gazów są zbudowane z dwóch warstw. Warstwa wewnętrzna (tzw. liner) jest odpowiedzialna za gromadzenie gazu oraz nadanie całej konstrukcji odpowiedniego kształtu. Musi ona zapewnić barierę dla gazu, tak by jego cząsteczki nie przenikały poza zbiornik. Liner może być wykonany z metalu (odpowiednie gatunki stali bądź stopy aluminium), bądź też z tworzywa sztucznego (polimery). Warstwa zewnętrzna jest warstwą przenoszącą obciążenia i najczęściej jest wykonana z kompozytu węglowo-epoksydowego lub szklano-epoksydowego. Włókna warstwy kompozytowej ułożone są w sposób uporządkowany i zaprogramowany, stosownie do przewidywanych obciążeń konstrukcji [1].

Spektakularnym przykładem nowoczesnej konstrukcji tego typu jest lekki, wysokowytrzymały zbiornik na sprężony wodór (stosowany jako paliwo - oznaczany najczęściej skrótowo jako CH₂, Compressed Hydrogen), niezbędny do zasilania ogniw paliwowych lub silników spalinowych w samochodach, pojazdach specjalistycznych (np. maszyny górnicze) oraz innych urządzeniach (np. stacjonarne agregaty prądotwórcze, itp.). Znaczenie naukowe i inżynierskie zbiornika CH₂ jest następstwem konieczności gromadzenia wodoru pod ciśnieniem roboczym (ang.: Nominal Working Pressure, NWP) dochodzącym do 70 MPa oraz zapewnienia bezpiecznej pracy zbiornika o wzmocnieniu wykonanym z kompozytu węglowo-epoksydowego, aż do ciśnienia nie mniejszego niż 164,5 MPa (ang.: Burst Pressure) [2]. W przypadku konstrukcji wzmocnionych włóknami szklanymi ciśnienie to osiąga wartości znacząco wyższe (ze względu na różne wielkości współczynników bezpieczeństwa) i wynosi 255,5 MPa.

Równocześnie masa własna zbiornika musi być na tyle niska, by możliwe było jego instalowanie w samochodzie osobowym, bez konieczności ograniczania przestrzeni bagażowej, przy zapewnieniu zasięgu samochodu nie mniejszego niż 500÷600 km (przy jednym tankowaniu). Wspomniane ograniczenia wymuszają stosowanie zbiorników całkowicie kompozytowych (tzw. 4-tej generacji), w których liner wykonany jest z tworzywa sztucznego typu „high density”, a element nośny, czyli tzw. płaszcz, z nawoju powstałego najczęściej ze specjalnej odmiany włókna węglowego. Zbiornik tego typu jest zintegrowanym produktem high-tech, w którym wszystkie elementy, a więc materiały (włókna

węglowe lub aramidowe), obliczenia, konstrukcja, technologia wykonania linera i opłotu, jak również metodyka badań testujących, są zgodne z najnowszymi osiągnięciami techniki [3]. Podobne wymagania występują w przypadku zbiorników kompozytowych na sprężony metan (ang.: Compressed Natural Gas, CNG). Nominalne ciśnienia robocze dla tych konstrukcji sięgają 200 barów (w Europie), natomiast ciśnienie rozrywania nie może być mniejsze niż 470 barów [4].

Konstruowaniem i wytwarzaniem kompozytowych wysokociśnieniowych zbiorników na wodór zajmuje się niewiele jednostek badawczych. Jest to domena jedynie kilku najbardziej zaawansowanych naukowo i technologicznie producentów światowych (np. Dyntek, Ullit, Mannesmann, Faber, Hexagon, Lincoln Composites, Xperion). Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej (IMiMT PWr) prowadzi od lat badania nad materiałami, technologią i optymalizacją konstrukcji wysokociśnieniowych, kompozytowych butli na paliwa gazowe, a także systemami do monitorowania ich stanu technicznego.

1.2 Monitorowanie wysokociśnieniowych konstrukcji z wykorzystaniem czujników światłowodowych

Konstrukcje kompozytowe, takie jak zbiorniki przeznaczone do przechowywania wysokospężonych paliw gazowych (CH_2 , CNG), w celu zwiększenia bezpieczeństwa ich użytkowania wymagają ciągłej kontroli stanu technicznego. Jedną z metod wspomagających zabezpieczanie obiektów technicznych przed awariami oraz ewentualną katastrofą (związaną np. z wybuchem gazu na skutek rozszczelnienia zbiornika) jest zastosowanie nowoczesnych narzędzi diagnostycznych (w tym systemów pomiarowych), które pozwalają na zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa obiektu w trakcie jego użytkowania.

Systemy kontrolno-pomiarowe są szeroko wykorzystywane w różnych dziedzinach techniki do weryfikacji stanu technicznego obiektów. Jednakże ocena sprawności technicznej kompozytowego zbiornika ciśnieniowego jest zadaniem trudnym. Złożoność schematów statycznych, duża różnorodność stosowanych konstrukcji (każdy producent stosuje swoje rozwiązania techniczne), a przede wszystkim postępująca degradacja materiałów w strukturze, nastrocza wiele problemów, a jej wiarygodność jest dyskusyjna, a czasami wręcz niemożliwa do weryfikacji. Standardowe metody takie jak radiografia, skanowanie ultradźwiękowe, emisja akustyczna czy też wizualna inspekcja nie znajdują zastosowania w procesie monitorowania "on-line" takich obiektów jak zbiorniki, a jedynie w ich okresowych kontrolach.

Jedną z metod, która może wspomagać ocenę techniczną zbiorników i zwiększać bezpieczeństwo ich stosowania jest zintegrowanie z nim systemu monitorującego typu SHM (ang.: Structural Health Monitoring). System ten realizuje ciągły pomiar różnych wielko-

ści fizycznych (najczęściej przemieszczeń oraz temperatury), co umożliwia określanie innych wielkości (np. rozkład pola naprężeń/odkształceń i temperatur, pełzanie, inicjacja i propagacja delaminacji oraz pęknięć, wykrywanie i lokalizacja przecieków, itp.). Ogólne cele stawiane systemom przeznaczonym do monitorowania konstrukcji (nie tylko zbiorników ciśnieniowych) sprowadzić można do tego, by:

- zwiększać bezpieczeństwo obiektu podczas jego użytkowania (ciągły pomiar umożliwia kontrolowanie stanu konstrukcji w czasie oraz wykrywanie parametrów krytycznych związanych np. z zewnętrznymi uderzeniami, przekroczeniem dopuszczalnych zakresów ciśnienia lub/i temperatury w trakcie tankowania, użytkowania, itp.),
- rejestrować zachowanie się obiektu w okresie jego użytkowania (weryfikacja założeń i modeli przyjętych na etapie projektowania oraz określenie stopnia wyężenia),
- informować o pojawiających się zagrożeniach ze strony samej konstrukcji (szacowanie degradacji technicznej konstrukcji, a także prognozowanie żywotności obiektu),
- wspomagać optymalizację kosztów eksploatacji (wymiana uszkodzonych elementów w momencie zaistnienia potrzeby),
- powiększać wiedzę o rzeczywistym zachowaniu obiektu.

Aplikacja systemów SHM w postaci tzw. „on-board monitoring systems”, czyli układów które na stałe zainstalowane są na monitorowanym obiekcie (np. zbiorniku ciśnieniowym) umożliwiają ciągły pomiar krytycznych parametrów konstrukcji. Niemniej jednak możliwe jest również jej wykorzystanie okresowe np. przez stacje diagnostyczne w trakcie badań okresowych (okresowy dozór i dopuszczalność eksploatacji zbiornika). Zintegrowane czujniki zarejestrują historię obciążeń, a w trakcie badań diagnostycznych możliwa będzie ich weryfikacja.

Rozwiązaniem technicznym umożliwiającym ciągłą kontrolę nowoczesnych zbiorników kompozytowych jest wykorzystanie do tego celu czujników światłowodowych. Związane jest to m.in. z możliwością ich integracji ze strukturą materiału kompozytowego, odpornością na zakłócenia elektromagnetyczne, dużą czułością pomiarową, a przede wszystkim iskrobezpieczeństwem. Ostatni z wymienionych parametrów (beziskrowość) ma szczególne znaczenie w przypadku pracy w pobliżu gazów energetycznych (tj. metanu czy wodoru).

Istotnym aspektem związanym z użytkowaniem wysokociśnieniowych, kompozytowych zbiorników są szczególnie wysokie wartości nominalnych ciśnień pracy, które przekładają się na wspomniany już wysoki stopień wyężenia konstrukcji, a tym samym duże wartości odkształceń struktury kompozytowej (relatywnie do konstrukcji metalowych typu 1-go o zbliżonych parametrach eksploatacyjnych). Ogranicza to w znaczący sposób aplikację standardowych czujników tensometrycznych, które nie spełniają wymogów obciążeń cyklicznych, przy dużych wartościach odkształceń.

Nie bez znaczenia pozostaje również fakt, iż w przypadku zbiorników kompozytowych, „wodorowych”, o nominalnym ciśnieniu pracy wynoszącym 70 MPa, grubość ścianki nośnej może wynosić nawet 20÷50 mm. W przypadku tak złożonych konstrukcji koniecznym staje się pomiar odkształceń konstrukcji w wielu miejscach, w tym także po grubości ścianki (nie można stosować stanu powłokowego). Wprowadzenie czujników innych niż światłowodowe (o niewielkiej średnicy przekroju) pomiędzy kolejne warstwy kompozytu skutkuje wstępnym zdefektowaniem materiału kompozytowego (swoisty karb). W przypadku wspomnianych już czujników tensometrycznych powstają miejsca nieciągłości struktury (m.in. lokalne delaminacje), które mogą być prekursorami rozwoju uszkodzeń w trakcie codziennej eksploatacji zbiornika (cykliczne tankowanie i roztankowywanie zbiornika).

Aplikacja czujników światłowodowych (np. FBG, F-P, mikrougięciowe) umożliwia lokalny pomiar stanu odkształcenia¹ powłoki nośnej zbiornika (wielkość punktu pomiarowego od 1 mm w przypadku czujników F-P do 1 cm dla światłowodowych siatek Bragga), ale dzięki możliwościom multipleksacji, może się to odbywać w wielu miejscach równocześnie. Umożliwia to stworzenie rozłożonej na całym zbiorniku sieci pomiarowej (swoistego rodzaju układu nerwowego monitorowanego obiektu), która poprzez analizowanie sygnałów z wielu punktów pomiarowych, pozwala na tworzenie map rozkładu pola odkształceń.

Podstawowym problemem w przypadku konstrukcji kompozytowych jest pomiar kumulacji uszkodzeń oraz ocena degradacji wzmocnienia. W warunkach laboratoryjnych możliwa jest jej kwantyfikacja poprzez pomiary metodą emisji akustycznej. Jednakże jak już wspomniano, jej wykorzystanie w systemach typu „on-line” w samochodzie jest niemożliwe. Szum generowany przez otoczenie (silnik, układ jezdny, itp.) powoduje, że pomiary obarczone są dużymi błędami. Jednakże możliwe jest swoistego rodzaju wyskalowanie systemu SHM opartego o punktowe pomiary odkształceń metodami światłowodowymi z użyciem metod emisji akustycznej w trakcie badań laboratoryjnych. Lokalna degradacja powłoki nośnej zbiornika (np. pękanie włókien wzmocnienia, delaminacje) powoduje lokalny wzrost odkształceń, które mogą być rejestrowane metodami pomiarowymi o wystarczająco dużej rozdzielczości/dokładności pomiarowej. Identyfikacja stanu odkształcenia i stopnia kumulacji uszkodzenia (poprzez porównanie wartości rzeczywistych z modelem numerycznym oraz wynikami eksperymentalnymi, np. zbiorniki z programowanymi uszkodzeniami) umożliwia oszacowanie stopnia zużycia zbiornika (ocena żywot-

¹ W pracy zadeklarowano możliwość wyznaczenia stanu odkształcenia, co oznacza możliwość pomiaru wszystkich składowych tensora, czyli zarówno odkształceń normalnych, czyli liniowych (ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z) jak i postaciowych (γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{xz}). Proponowane metody z użyciem czujników światłowodowych rzeczywiście na to pozwalają, co potwierdza literatura przedmiotu i doświadczenie autora. Z drugiej strony znajomość obiektu badań jak i ograniczenia czasowe i ekonomiczne uzasadniały pomiar jedynie odkształceń normalnych i to (głównie) na powierzchni zewnętrznej zbiornika kompozytowego. Dlatego zaprezentowano w pracy pomiary odkształceń normalnych, zarówno dla obciążeń quasi-statycznych jak i cyklicznych.

ności) oraz okresu bezpiecznej eksploatacji. Ponadto wykorzystanie odpowiednich algorytmów obróbki danych pomiarowych umożliwia lokalizowanie parametrów krytycznych (miejsca występowania defektów materiałowych) w konstrukcji.

Światłowodowe systemy SHM umożliwiają również ich aplikację w prowadzonych badaniach laboratoryjnych zbiorników, np. w badaniach statycznych, niszczących, cyklicznych, zarówno w temperaturach otoczenia (pokojowych), jak również w temperaturach ekstremalnych (od -40 do $+85$ °C), dzięki czemu są zgodne z wymaganiami stawianymi w normach z zakresu wysokociśnieniowego gromadzenia paliw gazowych.

Implementacja czujników światłowodowych do pomiarów odkształceń powłoki kompozytowej zbiorników ma jeszcze jedną zaletę. Mianowicie jest ona kompatybilna z technologią produkcji samych zbiorników kompozytowych, które najczęściej wytwarzane są metodą nawijania bądź też wyplatania włókna długiego. Włókno światłowodowe z czujnikami można wprowadzić bezpośrednio do rowingu szklanego lub węglowego i nakładać równocześnie z włóknami wzmocnienia. Oznacza to również, że tego typu czujniki mogą być też wykorzystane do kontroli różnych faz technologii wytwarzania zbiornika.

Prowadzone od kilkunastu lat badania nad samymi czujnikami światłowodowymi, potwierdzają, iż umożliwiają one uzyskanie poprawnych (stabilnych) wyników w całym okresie eksploatacji, który dla kompozytowych zbiorników ciśnieniowych producenci określają na 10-15 lat. Ponadto spełniają specyficzne dla branży samochodowej wymagania techniczne (np. kompatybilność elektromagnetyczna, zasilanie urządzeń pomiarowych napięciem ≤ 5 V DC oraz prądem o natężeniu ≤ 15 mA, zakres temperatur pracy od -40 do $+85$ °C, odporność na drgania, wstrząsy, wilgoć, korozję, zapylenie, itp.).

Co więcej, istnieje duża różnorodność spotykanych konstrukcji światłowodowych głowic pomiarowych, umożliwiająca dobranie odpowiedniej z nich do rozwiązania określonego problemu. Wzrost popularności techniki światłowodowej skutkuje spadkiem cen urządzeń pomiarowych oraz samych czujników, rozwojem technik instalacyjnych, a także rozwojem narzędzi przeznaczonych do analizy uzyskiwanych danych pomiarowych.

Analiza literatury przedmiotu wykazuje, iż uprzednio w kilku ośrodkach podjęte zostały próby stosowania czujników światłowodowych do badania stanu odkształcenia zbiorników typu CNG i CH₂. Bliższe dane na ten temat zawarto w rozdziale 3, zatytułowanym „Zastosowania czujników światłowodowych w pomiarach wybranych elementów i konstrukcji kompozytowych”. Z przeglądu prac wynika, że dotychczasowe próby polegały głównie na możliwości aplikacji czujników światłowodowych do pomiaru lokalnych odkształceń powłoki kompozytowej. Większość z prezentowanych wyników aplikacji czujników światłowodowych jest związana z pomiarami próbek w postaci laminatów. Prace, które dotyczą aplikacji światłowodowych metod pomiaru pola odkształceń w zbiornikach są w dużej mierze oparte na zbiornikach niskociśnieniowych o cienkich ściankach, wykonywanych na potrzeby konkretnych prac eksperymentalnych (w przeciwieństwie do ko-

mercyjnych produktów przeznaczonych do gromadzenia CNG/CH₂ o ciśnieniach pracy sięgających 700 barów). Ponadto w analizowanych pracach innych autorów, zarówno badania statyczne jak i cykliczne, nie były przeprowadzane zgodnie z wymaganiami normowymi (w odniesieniu do konstrukcji CNG i CH₂), a jedynie w ramach programów badawczych ustalonych na potrzeby prowadzonych prac eksperymentalnych.

Podstawową stosowaną techniką pomiarową w analizowanych pracach jest technika światłowodowa bazująca na tzw. siatkach Bragga (ang.: Fiber Bragg Grating, FBG). W jednej z prac zastosowano również czujniki interferometryczne typu SOFO® oraz Fabry-Perot (F-P), jednakże nie wskazano, która z metod może stanowić lepsze rozwiązanie w odniesieniu do monitorowania stanu technicznego wysokowyciężonych zbiorników kompozytowych.

Ponadto w analizowanych pracach nie rozważano problemu monitorowania stanu technicznego całej konstrukcji kompozytowego zbiornika wysokociśnieniowego, zarówno w trakcie obciążeń statycznych oraz cyklicznych. Do tej pory nie były prezentowane wyniki pomiarów stanu odkształceń zbiorników w trakcie długotrwałych badań cyklicznych zbiorników, aż do momentu zniszczenia i związanego z tym problemu kumulacji uszkodzeń powłoki kompozytowej. Nie analizowano możliwości oceny stanu technicznego zbiornika, oraz szacowania stopnia degradacji materiału kompozytowego poprzez pomiar odkształceń warstwy kompozytowej. Prócz tego tematem, który do tej pory nie był poruszany jest możliwość implementacji czujników światłowodowych w trakcie procesu wyplatania, przesycania próżniowego, utwardzania oraz badań zbiorników wykonanych metodą wyplotu włókna długiego, czyli technologii wytwarzania.

Novum niniejszej pracy polega między innymi na kompleksowym podejściu do problemu oceny stanu technicznego wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego, przeznaczonego do gromadzenia sprężonego wodoru lub metanu o ciśnieniach pracy dochodzących do 700 barów.

Rozpatrzono między innymi możliwość testowania układu monitorowania stanu technicznego konstrukcji wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego z wykorzystaniem tzw. programowanych uszkodzeń. W badaniach tych symulowano pojawienie się defektów w strukturze materiału kompozytowego, co umożliwiło optymalizację układu SHM na rzeczywistych obiektach. Jako układ pomiaru odkształceń zastosowano zarówno czujniki typu FBG jak również czujniki interferometryczne typu SOFO®. Dzięki temu możliwym stało się porównanie obydwu metod pomiarowych i ostatecznie wybór tej, która charakteryzowała się większą czułością wykrywania defektów.

Ponadto na próbkach typu NOL w trakcie badań quasi-statycznych oraz na pełzanie przeprowadzono kalibrację systemu pomiarowego bazującego na światłowodowych siatkach Bragga przeznaczonych do pomiaru odkształceń poprzez równoczesny pomiar zdarzeń metodą emisji akustycznej. Prócz tego przeprowadzono szereg badań na próbkach

rurowych oraz testowych zbiornikach ciśnieniowych, mających na celu dobór światłowodowego systemu pomiarowego do monitorowania stanu technicznego zbiorników komercyjnych.

W pracy wyeksponowano zagadnienia eksperymentalne związane z pomiarami, świadomie pomijając aspekty modelowania numerycznego materiałów i konstrukcji kompozytowych. Pamiętać jednak należy, iż w wielu zagadnieniach pomiarowych rola modelowania (np. wskazanie liczby i lokalizacji czujników, wyznaczenie teoretycznego stanu odkształcenia w skali mezo- i makroskopowej, rozkładu temperatury) jest ważna.

1.3 Teza, cel pracy i działania o znaczeniu kluczowym

Podzielając pogląd, że nowoczesne światłowodowe systemy pomiarowe umożliwiają lokalny pomiar pola odkształceń w bardzo szerokim zakresie, przy równoczesnym zapewnieniu wysokiej dokładności, podjęto próbę stworzenia i weryfikacji światłowodowego systemu SHM dla wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego, który poprzez lokalny pomiar odkształceń w wybranych punktach konstrukcji oraz analizę uzyskanych wielkości umożliwi jego bezpieczną eksploatację.

Mając na uwadze złożoność zagadnienia jakim jest monitorowanie stanu technicznego tak skomplikowanej konstrukcji mechanicznej jaką jest wysokociśnieniowy zbiornik kompozytowy, dokonano wyboru problemów, które rozważono w pracy. Zakreślając obszar tematyczny badań własnych przyjęto, iż:

- przedmiotem zainteresowania, a zarazem obiektami badawczymi będą przede wszystkim wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe przeznaczone do gromadzenia paliwa w postaci sprężonego metanu (CNG) lub wodoru (CH_2);
- przeprowadzone zostaną dodatkowe badania wstępne na próbkach rurowych oraz typu NOL;
- nastąpi określenie rodzaju, liczby oraz lokalizacji czujników na zbiorniku, co zapewni wystarczająco szybkie i dokładne wykrywanie defektów zagrażających rozszczelnieniu zbiornika,
- przeprowadzone będą badania na obiektach z tzw. programowanymi defektami (o znanej geometrii), co umożliwi przetestowanie zaproponowanej metody wykrywania uszkodzeń w zbiornikach wysokociśnieniowych;
- porównane zostaną możliwości różnych systemów pomiarowych, w tym układów z modulacją fazy sygnału optycznego (czujniki interferometryczne typu SOFO) wraz z dostępnymi układami z modulacją długości (światłowodowe siatki Bragga) oraz ich kalibrację z wykorzystaniem pomiarów metodą emisji akustycznej;
- pokazane zostaną wybrane kierunki badań w zakresie modelowania numerycznego konstrukcji kompozytowych. Jednocześnie uznano, iż problem „dobrego” modelo-

wania tej klasy zbiorników metodami numerycznymi jest wieloaspektowym, złożonym zagadnieniem wymagającym oddzielnych badań i wykraczającym poza zakres niniejszej rozprawy. Stworzenie poprawnego modelu numerycznego jest w chwili obecnej tematem projektów badawczych realizowanych przez konsorcja naukowe złożone z wielu ośrodków badawczych.

Mając na uwadze powyższe założenia oraz aktualny stan wiedzy sformułowano **tezę**,

Światłowodowe układy pomiarowe umożliwiają stworzenie zintegrowanego systemu monitorującego (ang.: Structural Health Monitoring System – SHMS) dla wysokociśnieniowych butli kompozytowych do gromadzenia paliw gazowych, który poprzez pomiary odkształceń oraz analizę ich zmian, pozwala na ocenę stanu kompozytowej warstwy nośnej.

Przyjęto jednocześnie, że:

- **Celem poznawczym** pracy jest identyfikacja stanu odkształcenia ekstremalnie obciążonych konstrukcji wysokociśnieniowych;
- **Celem aplikacyjnym** jest stworzenie systemu SHM dla wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego przeznaczonego do gromadzenia sprężonych paliw gazowych (metan, wodór), umożliwiającego ciągły i niezawodny monitoring konstrukcji w trakcie jej długoletniej eksploatacji oraz umożliwiającego oszacowanie stopnia degradacji kompozytowej powłoki nośnej zbiornika, a tym samym określenie czasu bezpiecznej eksploatacji. Za ważne uznano ponadto spełnienie - w możliwie szerokim zakresie - wymagań określonych w międzynarodowych regulacjach z zakresu certyfikacji tej klasy zbiorników.

W celu potwierdzenia sformułowanej powyżej tezy oraz osiągnięcia założonych celów, przyjęto plan badań, obejmujący następujące główne przedsięwzięcia:

1. **Badania wstępne na kompozytowych próbkach rurowych** wykonanych metodą nawijania oraz wplotu włókna ciągłego. Celem było sprawdzenie przydatności czujników światłowodowych w pomiarach odkształceń elementów kompozytowych, zbliżonych geometrycznie do zbiorników (część cylindryczna) oraz obciążanych ciśnieniem wewnętrznym. Ponadto sprawdzano możliwość wyznaczenia momentu, w którym następuje efekt ścinania na granicy faz (włókno wzmocnienia – matryca). Dodatkowo dla próbek rurowych (wykonanych metodą nawijania) przeprowadzono symulacje numeryczne w celu sprawdzenia poprawności uzyskanych wyników pomiarowych.

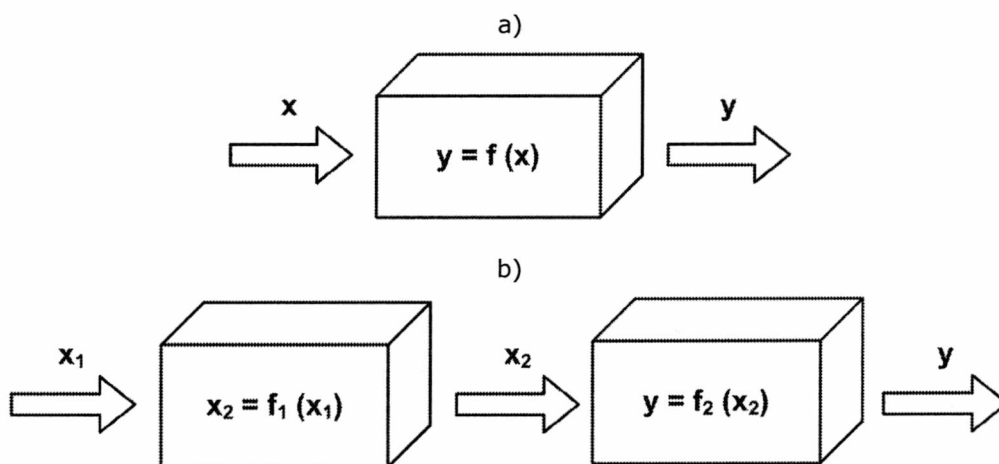
2. **Badania na próbkach rurowych z programowanymi defektami.** Celem było zarejestrowanie odpowiedzi czujników światłowodowych na odkształcenia materiału kompozytowego spowodowane lokalnym uszkodzeniem linera. Ważne było również określenie optymalnej odległości pomiędzy czujnikami, a skutecznością identyfikacji defektu. Dodatkowo możliwe było porównanie wyników pomiarów z rezultatami symulacji numerycznych.
3. **Badania statyczne oraz badania na pełzanie na próbkach kompozytowych typu NOL.** Przyjęto, iż celem będzie sprawdzenie łącznej przydatności światłowodowego układu FBG do pomiaru odkształceń, zarówno w warunkach quasistatycznych jak i w procesie pełzania. Dodatkowo przyjęto, iż sprawdzona zostanie możliwość kalibracji optycznego układu pomiarowego przez równoczesną rejestrację emisji akustycznej, co umożliwiłoby rejestrację procesu kumulacji uszkodzenia struktury kompozytowej.
4. **Badania cykliczne z wykorzystaniem wysokociśnieniowych kompozytowych zbiorników komercyjnych.** Celem było sprawdzenie przydatności czujników światłowodowych w cyklicznych pomiarach odkształceń zbiornika w trakcie eksploatacji (czyli symulujących tankowanie i roztankowanie w przedziale ciśnień od 2 do 87,5 MPa) oraz możliwości rejestracji procesu degradacji kompozytowej powłoki nośnej zbiornika poprzez pomiary lokalnych odkształceń.
5. **Badania statyczne z wykorzystaniem wysokociśnieniowych kompozytowych zbiorników komercyjnych.** Celem było sprawdzenie przydatności czujników światłowodowych do monitorowania ekstremalnie wyłożonych konstrukcji kompozytowych (aż do zniszczenia), dla których wartości lokalnych odkształceń sięgają 3%.
6. **Badania statyczne i cykliczne zbiorników komercyjnych z programowanymi defektami (nacięciami oraz delaminacją).** Celem było sprawdzenie przydatności układu pomiarowego w wykrywaniu defektów powstających w strukturze kompozytowego wzmocnienia zbiornika w trakcie jego eksploatacji, w tym również kumulacji uszkodzeń. Ponadto uznano za niezbędne porównanie systemów optycznych o różnych długościach głowic pomiarowych i wskazanie rozwiązania optymalnego.
7. **Badania z wykorzystaniem prototypowego kompozytowego zbiornika, wykonanego metodą wylotu ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi.** Celem było sprawdzenie możliwości integracji czujników światłowodowych typu FBG oraz SO-FO® z kompozytową strukturą nośną zbiornika w trakcie procesu produkcyjnego, co pozwoliłoby na ciągłą analizę stanu odkształceń, zarówno na etapie produkcji (wylatanie, infiltracja, utwardzanie), jak również w trakcie badań laboratoryjnych.

Zagadnienia te sukcesywnie rozpatrzono w kolejnych rozdziałach rozprawy. Przyjęto ponadto, iż próbki (rurowe, NOL) oraz zbiorniki prototypowe zostaną wytworzone w Instytucie przy udziale autora, a zbiorniki komercyjne pozyskane od renomowanych dostawców w ramach wspólnie realizowanych projektów badawczych.

2 Systemy pomiarowe oparte na czujnikach światłowodowych

2.1 Wprowadzenie – definicja czujnika światłowodowego

Czujnik pomiarowy można zdefiniować jako element (blok) funkcjonalny, który odwzorowuje w sposób jednoznaczny sygnał fizyczny jednego rodzaju na sygnał fizyczny innego rodzaju. Najczęściej spotykane czujniki umożliwiają przetworzenie m.in. energii magnetycznej, chemicznej, radiacyjnej, termicznej, czy też mechanicznej na sygnał elektryczny. Czujniki oparte na technice światłowodowej, to przetworniki z tzw. podwójnym przetwarzaniem (Rys. 2.1). Oznacza to, że np. energia mechaniczna (w postaci odkształceń) moduluje sygnał optyczny, a ten poprzez odpowiednie przetworniki (detektory) zamieniany jest na elektryczny [5].



Rys. 2.1. Idea działania czujnika standardowego z pojedynczym przetwarzaniem (a) oraz czujnika światłowodowego z podwójnym przetwarzaniem (b) [5].

Od przetworników pomiarowych wymaga się przede wszystkim, aby zapewniały stabilność mierzonych wielkości fizycznych w czasie. W przypadku, gdy ten warunek nie jest spełniony, dokonane pomiary mogą być obarczone dużymi błędami. Ponadto przetworniki pomiarowe powinny charakteryzować się odpowiednią czułością pomiarową, przy jednoczesnej odporności na zakłócenia zewnętrzne. Im wyższa jest ich czułość (stosunek sygnał-szum), tym mniejsze zmiany sygnału fizycznego są możliwe do zarejestrowania. Dodatkową zaletą jest liniowa charakterystyka przetwarzania wielkości wejściowych (funkcje $f_n(x_n)$). Wszystkie wyżej wymienione parametry doskonale spełniają czujniki światłowodowe.

Charakteryzują się one szeregiem zalet, które związane są z właściwościami samych światłowodów. Ponieważ są zbudowane z materiałów dielektrycznych (najczęściej szkło, ewentualnie polimery, np. polimetakrylan metylu – PMMA) są całkowicie odporne na działanie nawet bardzo silnych pól elektromagnetycznych. Przy zastosowaniu dodatko-

wych warstw ochronnych możliwa jest ich aplikacja w obszarach o wysokich temperaturach (standardowo do 300 °C, specjalne do ~1000 °C [6, 7]).

Ponieważ mierzone pole zewnętrzne moduluje tylko sygnał optyczny, który dopiero w detektorze jest zamieniany na sygnał elektryczny, dlatego też nie ma możliwości występowania iskrzenia elektrycznego. Jest to szczególnie istotne, kiedy monitorowany obiekt (element) jest łatwopalny i wymagane jest zminimalizowanie zagrożenia samozapłonem, pochodzącym od systemu pomiarowego, tak jak ma to miejsce w przypadku wysokociśnieniowych zbiorników do gromadzenia wodoru lub metanu.

Dzięki małym wymiarom poprzecznym oraz pomijalnie małemu ciężarowi, możliwa jest łatwa integracja czujników OFS z monitorowanym obiektem. Coraz częściej można spotkać rozwiązania elementów wykonanych z materiału kompozytowego, w którego strukturę „wbudowano” światłowodowe głowice pomiarowe, np. [8]. Tak umiejscowiony czujnik, dzięki niewielkim wymiarom, nie zmienia parametrów mechanicznych monitorowanej konstrukcji. Istotnym parametrem opisywanych przetworników pomiarowych jest również odporność na obciążenia cykliczne. W przeciwieństwie np. do klasycznych tensometrów oporowych, stosowanych do pomiarów odkształceń, nie występują w nich efekty związane z cyklicznym osłabianiem materiału.

2.2 Podstawowe zastosowania czujników światłowodowych w monitorowaniu obiektów technicznych

Podstawowymi parametrami fizycznymi, które moduluje promieniowanie optyczne propagowane w światłowodzie są odkształcenia (pochodzące od zmian zewnętrznej energii mechanicznej) oraz temperatura (zmiany energii termicznej). Przetworzenie (przeskalowanie) tych podstawowych wielkości fizycznych umożliwia dopiero konstruowanie przetworników innych wielkości fizycznych i pozwala na dokonywanie pomiarów innych parametrów. Możliwe zatem jest wykorzystanie czujników światłowodowych w wielu dziedzinach, między innymi do pomiarów parametrów [9]:

- mechanicznych: siła, odkształcenie, przemieszczenie, ciśnienie, pęknięcia,
- termicznych: temperatura, przepływ ciepła, pojemność cieplna, tzw. termomonitoring,
- elektrycznych: napięcie i natężenie prądu,
- chemicznych: skład chemiczny, stężenie gazów i cieczy,
- magnetyczne: natężenie pola i magnetostrykcja,
- promieniowanie: rentgenowskie i jądrowe,
- itp.

Kompleksowy monitoring stanu technicznego różnych elementów konstrukcji (zarówno obiektów budowlanych jak i mechanicznych), z wykorzystaniem czujników światłowo-

dowych, jest realizowany poprzez tzw. monitorowanie pośrednie. Oznacza to, iż szczegółowe informacje o obiekcie uzyskuje się przez analizę danych pomiarowych uzyskanych z pomiarów parametrów podstawowych, takich jak:

- odkształcenie średnie,
- temperatura (rozkład temperatur),
- średnie odkształcenie ścinające,
- inklinacja (rotacja).

Analiza wyżej wymienionych parametrów podstawowych pozwala natomiast, przy wykorzystaniu odpowiednich algorytmów (znając także własności materiałowe), na wyznaczenie innych własności mechanicznych i konstrukcyjnych, np.:

- kształt deformacji (krzywizna),
- rozkład naprężeń,
- rozkład przemieszczeń,
- rozkład pęknięć i ich charakterystykę,
- wykrywanie przecieków,
- oraz wiele innych.

Należy jednak pamiętać, iż samo monitorowanie obiektów technicznych, poprzez wyłącznie dokonywanie pomiarów określonych własności fizycznych, nie umożliwia stawiania diagnozy na temat stanu technicznego kontrolowanego obiektu (konstrukcji). W tym celu konieczne jest dokonanie szczegółowej kontroli obiektu i przeprowadzenie odpowiednich analiz. Wykrycie nietypowego, czy też innego od założonego, zachowania obiektu, jest zazwyczaj realizowane poprzez przeprowadzenie stosownych analiz (z wykorzystaniem odpowiednich algorytmów). Przez porównanie otrzymanych wyników z wartościami uzyskanymi z modelowania numerycznego, bądź też z dopuszczalnymi wartościami maksymalnymi zaproponowanymi przez projektanta, możliwe jest wczesne wykrycie pojawiających się zagrożeń. Efektywność procesu monitorowania stanu technicznego zależy zarówno od jakości wykonanych pomiarów jak i zastosowanych algorytmów [10, 11].

Światłowodowe systemy monitorowania stanu technicznego można wykorzystać między innymi w zakresie ogólnie pojętej:

1) Inżynierii lądowej (mosty, wiadukty, budynki, zabytki, tamy, drogi), gdzie możliwe są m.in.:

- pomiary przemieszczeń,
- monitorowanie naprężeń wstępnych,
- monitorowanie procesu pełzania,
- monitorowanie stanu betonu w trakcie wiązania (nowe oraz odnawiane konstrukcje),
- monitorowanie pęknięć,

- ocena uszkodzeń po wstrząsach sejsmicznych i innych,
- monitorowanie temperatury pod ziemią,
- monitorowanie deformacji nawierzchni,
- pomiar temperatury w wielu punktach (ostrzeganie przed oblodzeniem);

2) Energetyki:

- monitorowanie szczelności ścian elektrowni atomowych,
- monitorowanie chłodni kominowych,
- monitorowanie temperatury kabli elektroenergetycznych,
- monitorowanie kotłów energetycznych,
- monitorowanie rurociągów technologicznych absorberów,
- monitorowanie odkształceń linii elektro-energetycznych i słupów wysokiego napięcia;

3) Rurociągów i zbiorników:

- monitorowanie odkształceń i temperatury rurociągu,
- wykrywanie przecieków i innych uszkodzeń w rurociągach,
- monitorowanie podziemnych zbiorników paliwa,
- monitorowanie wysokociśnieniowych zbiorników paliwa,
- wykrywanie i lokalizacja skażeń chemicznych.

Wyżej wymienione zastosowania nie pokrywają wszystkich możliwości i mają na celu jedynie przedstawienie ogromnego potencjału, które dają systemy monitorowania stanu technicznego oparte na technice światłowodowej.

2.3 Klasyfikacja czujników światłowodowych

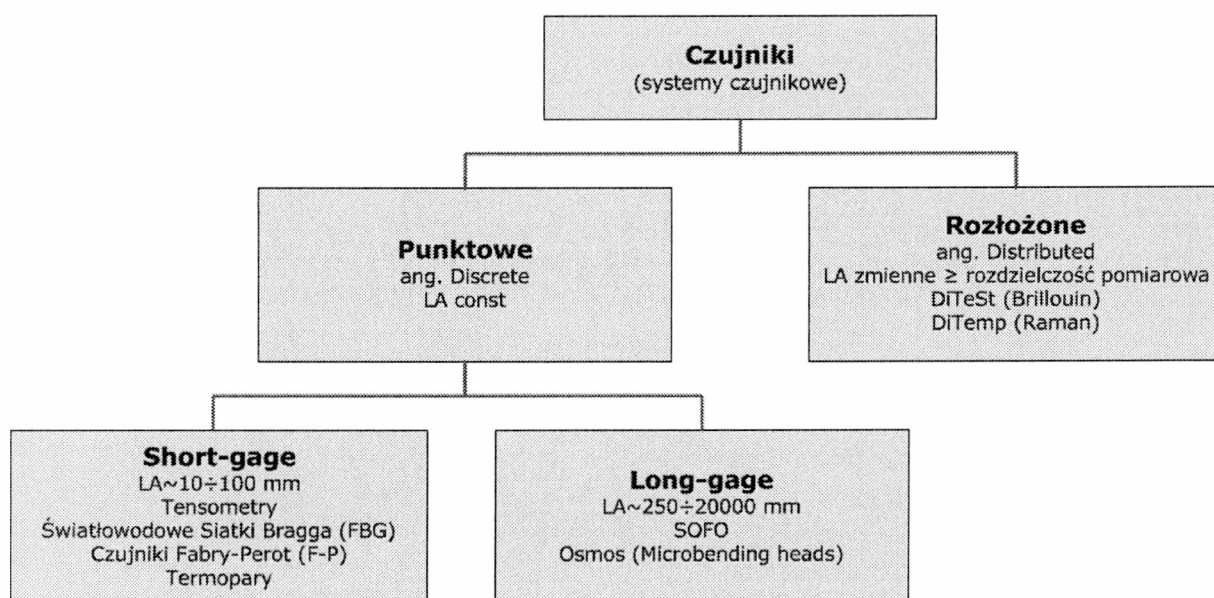
W literaturze przedmiotu czujniki światłowodowe w zależności od przyjętego kryterium klasyfikowane są na różne sposoby. Najbardziej naturalnym i najczęściej stosowanym jest podział czujników ze względu na modulowany parametr fali świetlnej. Zewnętrzne oddziaływania pól fizycznych mogą zatem zmieniać: amplitudę, długość fali (częstotliwość), fazę (odległość pomiędzy kolejnymi maksymami lub minimami fali), czy też polaryzację fali świetlnej (drgania wektora pola elektromagnetycznego). Wobec tego wykorzystując wspomnianą klasyfikację można wyróżnić następujące czujniki:

- amplitudowe (np. czujniki odbiciowe, mikrougięciowe, czujniki wykorzystujące rozpraszanie Ramana i Rayleigha),
- z modulacją długości fali (np. światłowodowe siatki Bragga FBG, czujniki wykorzystujące rozpraszanie Brillouina),
- interferencyjne (np. czujniki SOFO®, Fabry-Perot),
- polaryzacyjne.

Kolejna metoda klasyfikacji czujników światłowodowych, spotykana najczęściej w literaturze związaną z metodyką monitorowania obiektów technicznych z wykorzystaniem techniki światłowodowej, wykorzystuje podział ze względu na wielkość (rozmiar) mierzonego pola fizycznego (Rys. 2.2). Można tutaj wyróżnić następujące rodzaje czujników:

- punktowe (ang.: discrete sensors),
- pseudo-rozłożone (ang.: quasi-distributed sensors),
- rozłożone (ang.: distributed sensors).

Czujniki punktowe są to sensory o skończonej długości ramienia pomiarowego (ang.: Active Length, LA). W tej grupie możemy wyróżnić czujniki o krótkich (ang.: Short-gage) oraz długich (ang.: Long-gage) ramionach pomiarowych. Do sensorów typu „short-gage” zaliczyć można wszystkie czujniki o niewielkiej bazie pomiarowej. Umownie przyjmuje się, że są to czujniki o długości maksymalnej do 100 mm. Wyróżnić tutaj można m.in. tensometry oraz termopary, a ponadto czujniki światłowodowe typu FBG oraz Fabry-Perot. Światłowodowe czujniki wielkości fizycznych, należące do grupy czujników punktowych, działają analogicznie jak większość czujników używanych w standardowym miernictwie wielkości nieelektrycznych, metodami elektrycznymi [12]. Druga grupa czujników punktowych („long-gage”), to z kolei sensory, których długości ramion pomiarowych sięgają nawet kilkudziesięciu metrów. Pomimo tak znacznych długości ramion pomiarowych, zaliczane są one do grupy czujników punktowych ze względu na fakt, iż mierzona wielkość fizyczna (np. odkształcenie) jest wartością uśrednioną dla całej długości czujnika. Typowym przykładem są tutaj czujniki interferometryczne typu SOFO oraz mikrougięciowe OSMOS.



Rys. 2.2. Klasyfikacja czujników (systemów) ze względu na wielkość mierzonego zewnętrznego pola fizycznego (na podst. [13]).

Poprzez czujniki pseudo-rozłożone (zwane także wielopunktowymi) określane są systemy pomiarowe oparte na czujnikach punktowych, które są rozmieszczone na powierzchni, bądź też umiejscowione wewnątrz materiału. Pomiarów zewnętrznych pól fizycznych dokonuje się lokalnie, ale poprzez zastosowanie odpowiednio dużej liczby czujników możliwe jest monitorowanie całego obiektu, tworząc tzw. sieć czujników.

Odrębną grupę czujników stanowią tzw. czujniki rozłożone (Rys. 2.2). Głowicę czujnika stanowi w tych układach całkowita długość światłowodu podpiętego do układu pomiarowego, czyli wielkość mierzona jest przetwarzana w sposób ciągły na całej długości światłowodu pomiarowego. Stosowane są standardowe światłowody wielo- bądź też jednomodowe. Długości ramion pomiarowych tych sensorów mogą w specjalnych zastosowaniach (razem ze wzmacniaczami typu EDFA) sięgać nawet 150 km. W tego typu systemach pomiarowych wykorzystywane jest zjawisko rozpraszania fotonów na molekułach rdzenia światłowodu (rozpraszanie Brillouina i Ramana, rzadziej Rayleigha). Rozdzielczość pomiarowa (ang.: spatial resolution), czyli minimalna długość światłowodu, dla którego można wyznaczyć wartość mierzonego pola fizycznego, jest zależna od rozdzielczości pomiarowej zastosowanego układu pomiarowego i całkowitej długości czujnika. Umożliwia to stworzenie systemu monitorującego stan techniczny nawet bardzo dużych obiektów (typu mosty, budynki, tamy, tunele) z olbrzymią ilością punktów pomiarowych. Dla przykładu na głowicy pomiarowej o długości 10 km możliwe jest wydzielenie 20 000 punktów pomiarowych, czyli tak naprawdę pojedynczych czujników, w których możliwy będzie pomiar na przykład temperatury bądź też odkształceń (zakładając, że rozdzielczość pomiarowa układu jest równa 0,5 m).

Innym rodzajem klasyfikacji czujników światłowodowych jest ich podział ze względu na sposób modulacji fali świetlnej propagowanej w układzie pomiarowym. Wyróżnić tutaj można dwa rodzaje głowic pomiarowych: z modulacją zewnętrzną oraz wewnętrzną. Do układów z modulacją zewnętrzną zaliczyć można m.in. wszelkiego rodzaju czujniki odbiciowe, zmian transmisji, z siatkami dyfrakcyjnymi, gdzie sygnał optyczny jest wyprowadzany poza światłowód, tam jest modulowany przez zewnętrzne pole fizyczne, a następnie poprzez układ sprzęgający wprowadzany z powrotem do rdzenia światłowodu. Zatem rola światłowodu sprowadza się do doprowadzenia i odprowadzenia sygnału optycznego do i z przetwornika pomiarowego [12].

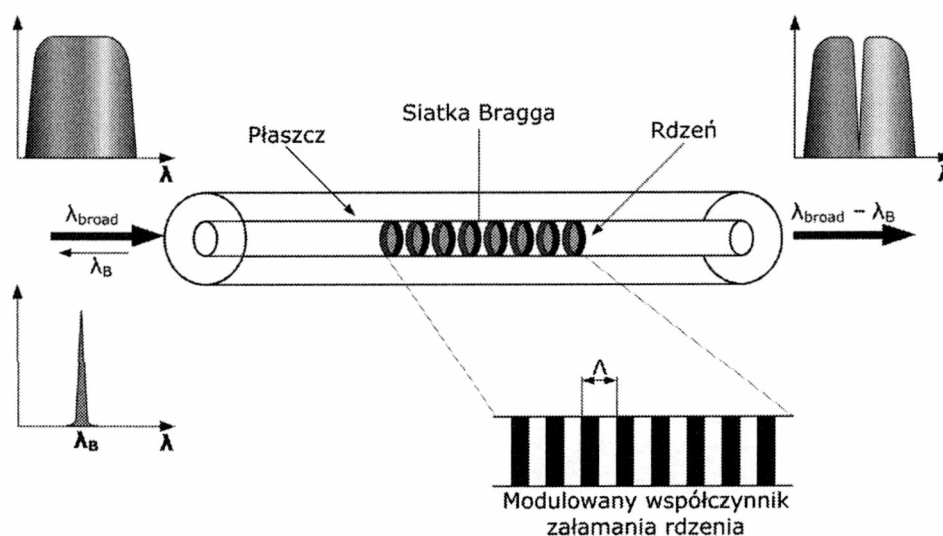
W czujnikach z modulacją wewnętrzną oddziaływanie sygnału optycznego z mierzonym polem fizycznym odbywa się w rdzeniu światłowodu, bez wyprowadzania światła na zewnątrz. Czyli światłowód spełnia nie tylko rolę falowodu prowadzącego światło, ale także rolę przetwornika optycznego. Najpopularniejszymi przetwornikami pomiarowymi są tutaj światłowodowe siatki Bragga, czujniki interferometryczne, czy też czujniki mikrougięciowe [12].

2.3.1 Czujniki z modulacją długości fali świetlnej

Najczęściej spotykanym przykładem czujnika z modulowaną długością fal stosowanego w pomiarach odkształceń i temperatury, jest tzw. światłowodowa siatka Bragg (ang.: Fiber Bragg Grating, FBG). Dzięki swoim niewielkim wymiarom (w porównaniu do dużych obiektów) jest to typowy przetwornik punktowy. Długość pojedynczej siatki mieści się w granicach 5÷10 mm. Dzięki doskonałym możliwościom multipleksacji możliwe jest łączenie wielu FBG w sieć czujników, tworząc wspomniany wcześniej system pseudo-rozłożony. Światłowodowa siatka Bragga jest strukturą wytworzoną w rdzeniu jednomodowego włókna światłowodowego (Rys. 2.3), charakteryzującą się periodycznymi zmianami wartości współczynnika załamania [14]. Występowanie takiej struktury w rdzeniu światłowodu powoduje to, iż część transmitowanego nim promieniowania optycznego jest odbijana od struktury siatki, a pozostała jego część jest propagowana dalej bez strat. Długość fali odbitej od siatki Bragga, tzw. fala Bragga (λ_B) i jest opisana zależnością [14]:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda, \quad (2.1)$$

gdzie: λ_B – długość fali Bragga, n_{eff} – efektywny współczynnik załamania rdzenia światłowodu, Λ – stała siatki Bragga. W dziedzinie metrologii największe zainteresowanie znalazły czujniki o równomiernym (ang.: uniform) rozkładzie zmian współczynnika załamania.



Rys. 2.3. Zasada działania światłowodowej siatki Bragga [14].

Z równania (2.1) można zauważyć, iż długość fali Bragga zależy od wartości efektywnego współczynnika załamania (n_{eff}) oraz stałej siatki (Λ). Przesunięcie długości fali Bragga $\Delta\lambda_B$ może być efektem wpływu temperatury oraz wydłużenia względnego jednocześnie. Odkształcenie przetwornika FBG wydłuża (lub skraca) odległość między płaszczyznami siatki różniącymi się współczynnikiem załamania, czyli zmienia się stała siatki. Po-

nadto na skutek efektu fotoelastycznego, czyli zmiany współczynnika załamania materiału pod wpływem odkształcenia, zmienia się wartość n_{eff} . Stała siatki może także ulec zmianie na skutek rozszerzalności cieplnej włókna szklanego. Na skutek efektu termooptycznego zmiana temperatury powoduje również zmianę wartości współczynnika załamania.

W związku z tym, odpowiedź siatki na czynniki zewnętrzne można opisać zależnością [15]:

$$\Delta\lambda_B(\varepsilon, T) = K_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + K_T \cdot \Delta T, \quad (2.2)$$

gdzie:

- $K_\varepsilon = \delta\lambda/\delta\varepsilon$ – czułość odkształceniowa; związana ze zmianą współczynnika załamania pod wpływem odkształceń (efekt fotoelastyczny) oraz ze zmianą okresu siatki, wynikającą ze zmian rozmiarów włókna (ściskanie, rozciąganie),
- $K_T = \delta\lambda/\delta T$ – czułość temperaturowa; związana ze zmianą okresu siatki, wynikającą z rozszerzalności cieplnej materiału oraz efektu termooptycznego, czyli zmianie współczynnika załamania pod wpływem temperatury (grzanie, chłodzenie) [15].

Jak już wspomniano, w zależności od czynników zewnętrznych (kierunku i intensywności odkształceń, zmian temperatury), odbite od siatki Bragga promieniowanie przesuwają się w stronę fal dłuższych lub krótszych. Odkształcenie włókna światłowodowego wyrażone jest w jednostkach odkształcenia (ε , strain). W rzeczywistości ε jest jednostką bezwymiarową. Jeżeli dla 1m światłowodu wydłużenie wynosi 1 μm , to rejestrowane czujnikiem odkształcenie wynosi 1 μm / 1 m = 1 $\mu\varepsilon$ (microstrain). Typowe przesunięcia długości fali Bragga przy odkształceniu 1 $\mu\varepsilon$ i zmianie temperatury czujnika o 1 $^\circ\text{C}$ zamieszczono w Tab. 2.1.

Tab. 2.1. Zmiany długości fali Bragga pod wpływem czynników zewnętrznych dla czujników pracujących w różnych oknach telekomunikacyjnych [16].

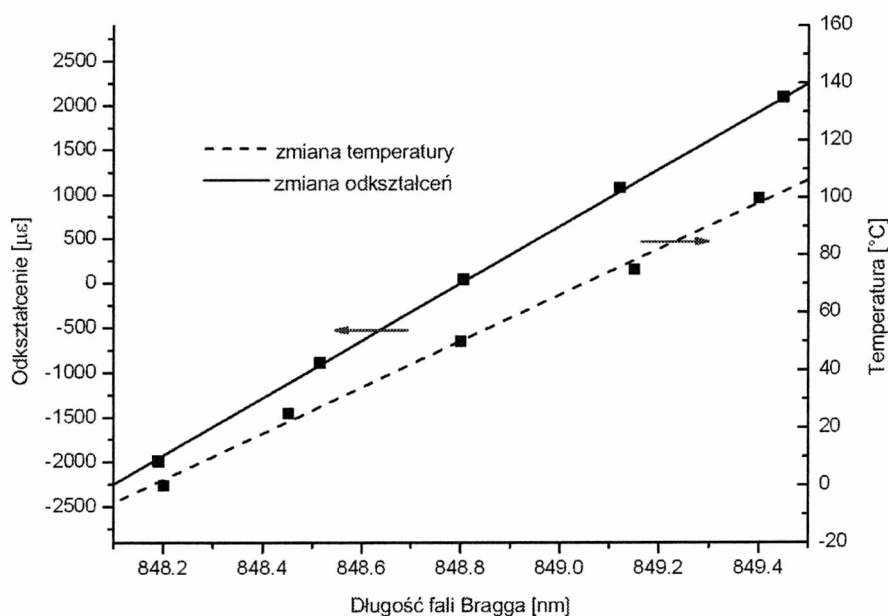
długość fali Bragga [nm]	zmiana dł. fali na 1 $\mu\varepsilon$ [pm/$\mu\varepsilon$]	zmiana dł. fali na 1 $^\circ\text{C}$ [pm/$^\circ\text{C}$]
830	~0,64	~6,8
1300	~1	~10
1550	~1,2	~13

Ze względu na istotny wpływ temperatury na zmianę długości fali Bragga (ok. 6,8 pm/ $^\circ\text{C}$ dla siatek ~850 nm), konieczna jest kompensacja jej wpływu na końcowy wynik pomiaru odkształceń. W tym celu stosowana jest dodatkowa siatka FBG, która jest odizolowana mechanicznie od próbki (nie ulega wpływowi odkształceń), ale umiejscowiona jednocześnie wystarczająco blisko, aby jej temperatura była taka sama jak czujnika umieszczonego na próbce. Pojawiające się wówczas na siatce kompensacyjnej

przesunięcie $\Delta\lambda_B$, wynikające ze zmiany temperatury, jest odejmowane od całkowitej zmiany $\Delta\lambda_B$ siatki monitorującej odkształcenie badanej próbki.

Światłowodowe siatki Bragga mogą być odpowiednikami standardowych elektrycznych czujników odkształceń i temperatury (tensometry oporowe, termopary). Poza zaletami, które są związane z właściwościami samych światłowodów, charakteryzują się one również tym, iż zmiana długości fali Bragga jest liniową funkcją mierzonej wielkości w szerokim zakresie (światłowod szklany odkształca się liniowo w całym zakresie, po czym kręcho pęka). A przede wszystkim informacja o wielkości mierzonej jest zakodowana w formie spektralnej (zmiana długości fali). Dzięki temu szumy, czy też straty mocy sygnału optycznego w transmisyjnym torze pomiarowym, nie wpływają na informacje o mierzonej wielkości fizycznej.

Przykładowa charakterystyka rejestrowanych odkształceń i temperatury czujnika w funkcji zmian długości fali Bragga przedstawiona została na (Rys. 2.4).



Rys. 2.4. Przykładowe zmiany długości fali Bragga pod wpływem odkształceń i temperatury.

Analiza sygnału optycznego odbitego od FBG, zawierającego informacje o mierzonej wielkości, odbywa się w jednostce pomiarowo-odczytowej (ang.: Signal Processing Unit, SPU) zwanej również interrogatorem lub demodulatorem długości fali. Jak już wspomniano wcześniej, informacja o wielkości mierzonej jest zakodowana spektralnie. W warunkach laboratoryjnych, do obserwacji widma fali odbitej lub przechodzącej, nieodzownym urządzeniem jest analizator widma optycznego. Jednak takie urządzenie nie nadaje się do zastosowań w rzeczywistych systemach czujnikowych. Spowodowane jest to nie tylko jego wysoką ceną, ale także małą dynamiką pomiaru.

Komercyjne jednostki pomiarowe SPU umożliwiają analizę widma odbiciowego z rozdzielczością dochodzącą do 0,2 pm, co odpowiada rozdzielczości pomiaru odkształceń równej 0,2 $\mu\epsilon$ oraz temperatury – 0,02 °C. Dokładność (powtarzalność) pomiarów wynosi odpowiednio 2 $\mu\epsilon$ oraz 0,2 °C, natomiast częstotliwość próbkowania sygnału może sięgać nawet 500 kHz dla pojedynczego czujnika [17]. Tak wysokie częstotliwości próbowania pozwalają na zastosowanie czujników FBG nawet jako przetworników w pomiarach emisji akustycznej [18]. Standardowo stosowane są jednak urządzenia o częstotliwościach do 10 kHz Hz, pozwalające na typowe pomiary statyczne oraz dynamiczne konstrukcji.

2.3.2 Czujniki z modulacją fazy fali świetlnej

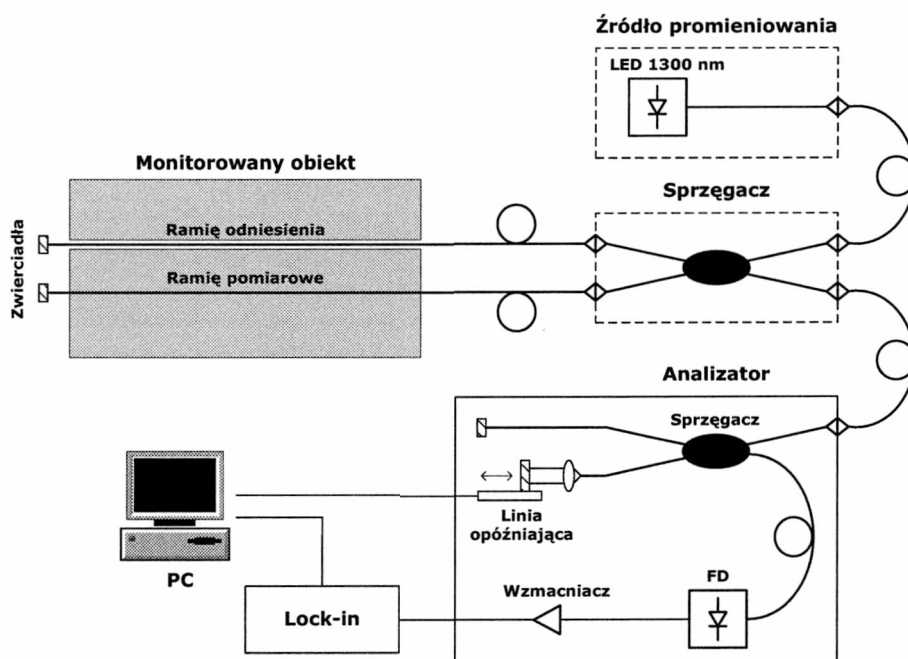
Kolejną grupę czujników spotykanych w monitorowaniu stanu technicznego obiektów stanowią czujniki interferometryczne. Charakteryzują się one modulacją fazy sygnału świetlnego propagowanego w układzie pomiarowym. Wśród interferometrów światłowodowych, podobnie jak w klasycznych interferometrach wykonanych w optycznych elementach objętościowych, wyróżnić można kilka grup (tzw. konfiguracji). Są to między innymi interferometry dwuwiazkowe (np.: Macha – Zehndera, Sagnaca, Michelsona) oraz wielowiazkowe (np. Fabry – Perota). Najczęściej wykorzystywanymi w pomiarach wielkości fizycznych takich jak przemieszczenia (odkształcenia) czy też temperatura, są układy Michelsona oraz Fabry – Perot.

Światłowodowe głowice pomiarowe w konfiguracji interferometru Michelsona, zbudowane są w oparciu o włókna jednomodowe, na końcu których uformowane zostały warstwy tworzące zwierciadła o wysokim współczynniku odbicia (rzędu 95 %). Rzadziej spotykane są układy wykorzystujące tzw. odbicie Fresnela, zachodzące na granicy światłowodu i powietrza. Głowice pomiarowe w postaci światłowodu jednomodowego mogą osiągać długości od kilku centymetrów do kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu metrów i mogą być zintegrowane albo z powierzchnią testowanego obiektu albo umiejscowione wewnątrz monitorowanej struktury. Pomimo znaczących długości ramion pomiarowych są to czujniki punktowe i przeznaczone do pomiarów przemieszczeń (odkształceń). Ich cechą charakterystyczną jest fakt, iż wielkość fizyczna (mezurand) mierzona jest na całej długości odcinka pomiarowego (uśrednianie po długości).

Pomiar polega na analizowaniu różnicy faz sygnałów optycznych rozchodzących się w dwóch ramionach niskokoherentnego interferometru Michelsona – pomiarowym oraz odniesienia [19]. Ramię pomiarowe jest w bezpośrednim kontakcie z badaną konstrukcją (może być np. przyklejone [20, 21]). 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 świetnej jest wynikiem zmiany długości światłowodu (zmiana długości drogi optycznej dla sygnału świetlnego), stanowiącego głowicę pomiarową. W wyniku interferencji obydwu wiązek, możliwe jest poprzez analizę prążków interferencyjnych ilościowe określenie odkształcenia czujnika, a tym samym monitorowanej konstrukcji.

Schemat układu analizującego, stosowanego m.in. w systemie pomiarowym SOFO® firmy SMARTEC, przedstawiony został na Rys. 2.5. Najważniejszymi elementami systemu są: dwa połączone ze sobą interferometry Michelsona, źródło promieniowania, detektor a także podłączony do niego nanowoltomierz fazoczuły (Lock-in). Układ pomiarowy zawierający w analizatorze umiejscowione na śrubie mikrometrycznej ruchome zwierciadło (tzw. linię opóźniającą) jest przeznaczony do pomiarów statycznych. Średni czas pomiaru dla jednej głowicy pomiarowej wynosi 7÷10 sekund. Istnieje również system SOFO przeznaczony do pomiarów dynamicznych, który jednak znacząco różni się konstrukcją analizatora. W miejsce ruchomej linii opóźniającej wstawiony został bowiem optoelektroniczny modulator Macha-Zendera, który pozwala zwiększyć prędkość próbkowania sygnału, a tym samym szybkość pomiaru do 20 kHz.



Rys. 2.5. Schemat systemu interferometrycznego układu pomiarowego firmy Smartec (na podst.: [20]).

Promieniowanie z diody elektroluminescencyjnej (ang.: Light-Emitting Diode, 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.

Następnie, poprzez kolejny sprzęgacz kierunkowy, promieniowanie kierowane jest do drugiego, referencyjnego interferometru Michelsona. W jednym z jego ramion zainstalowane jest ruchome zwierciadło. Możliwa jest kontrolowana zmiana jego położenia względem końca światłowodu w zakresie od 0 do 50 mm, z rozdzielczością 0.1 μm [20]. Pozwala to na wprowadzenie dokładnie zdefiniowanej różnicy w długościach ramion interferometru odniesienia (ΔL_2). Natężenie promieniowania wychodzącego z interferometru referencyjnego jest mierzone na fotodiodzie i jest określone następującymi zależnościami [20]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot v_{11}(\Delta\varphi) \cdot \cos(\Delta\varphi), \quad (2.3)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta L \cdot n_g}{\lambda_0}, \quad (2.4)$$

$$n_g = n_{\text{eff}} + v \left(\frac{dn}{dv} \right), \quad (2.5)$$

$$\Delta L = |\Delta L_1 - \Delta L_2|, \quad (2.6)$$

gdzie: n_{eff} – efektywny współczynnik załamania światłowodu, n_g – grupowy współczynnik załamania (ok. 1% większy niż n_{eff} dla krzemu), λ_0 – długość fali w próżni, v_{11} – funkcja autokorelacji, uwzględniająca charakterystykę spektralną źródła światła i zmianę długości drogi ΔL interferujących ze sobą sygnałów optycznych.

Interferencja może zajść, gdy różnica dróg ΔL_1 lub ΔL_2 jest mniejsza od drogi koherencji źródła promieniowania ΔL_c . Położenie ruchomego zwierciadła w interferometrze referencyjnym jest tak dobrane (dobrana jest wartość ΔL_2), aby intensywność analizowanych prążków interferencyjnych na fotodiodzie miała wartość maksymalną. Oznacza to, iż nie występuje przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem pochodzącym z interferometru pomiarowego i referencyjnego. Wówczas różnica pomiędzy długościami ramion interferometru pomiarowego ΔL_1 oraz referencyjnego ΔL_2 jest taka sama.

Różnica w długości ramion interferometru pomiarowego ΔL_1 jest proporcjonalna do deformacji struktury ΔL_s i można ją opisać zależnościami (dla światłowodów szklanych) [20]:

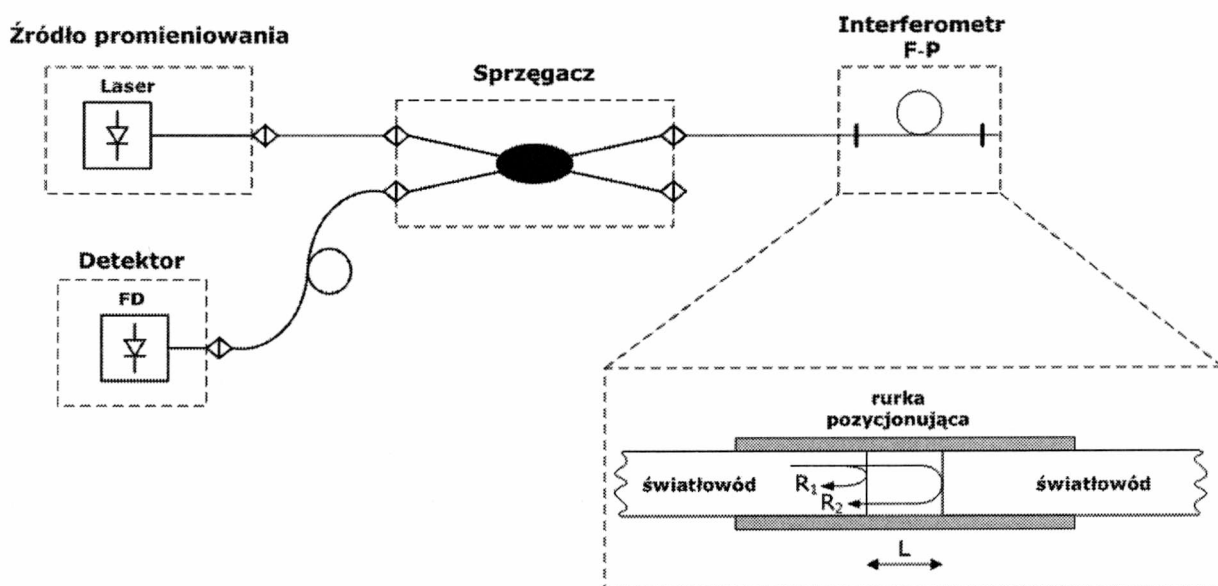
$$\Delta L_s = \Delta L_1 (n\xi)^{-1} \cong 0.78, \quad (2.7)$$

$$\xi = 1 - \frac{n^2 [(1-v) \cdot p_{12} - v \cdot p_{11}]}{2}, \quad (2.8)$$

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

Interferometryczne czujniki światłowodowe w konfiguracji Fabry – Perot (ang.: Fabry – Perot Interferometer, FPI) należą do grupy czujników wielowiązkowych, czyli takich w których zachodzi wielokrotne oddziaływanie propagowanych wiązek [12]. Pierwsze aplikacje wspomnianych czujników do pomiarów temperatury oraz odkształceń w materiałach kompozytowych pochodzą już z końca lat 80 ubiegłego wieku. Czujniki FPI charakteryzują się dużą czułością na zaburzenia wielkości fizycznych, wpływających na obszar znajdujący się pomiędzy dwoma zwierciadłami. Sama głowica pomiarowa może być bardzo mała, a jej długość wynosić nawet 1 milimetr. Czujniki te należą do grona czujników punktowych, o krótkich ramionach pomiarowych. W przeciwieństwie do układów w konfiguracji Michelsona, Macha-Zendera czy też Sagnacka nie jest konieczne stosowanie sprzęgaczy światłowodowych [14].

Typowy schemat światłowodowego układu interferometru F-P, umożliwiający pracę na wiązce przechodzącej jak i odbitej (z wykorzystaniem sprzęgacza), przedstawiony został poniżej (Rys. 2.6.). Układ podstawowy stanowią: źródło światła spójnego, odcinek światłowodu z naniesionymi na końcach półprzeźroczystymi zwierciadłami (stanowiącymi rezonator F-P) oraz detektora. Światło wychodzące z rezonatora o długości wnęki L jest superpozycją fal (R_1 , R_2), które wielokrotnie odbijały się od luster umieszczonych na jego końcach [12] i tworzy widmo interferencyjne [22].



Rys. 2.6. Schemat układu światłowodowego interferometru Fabry – Perota (na podst.: [12, 14]).

Miarą mierzonej wielkości fizycznej (np.: temperatura, odkształcenie, ciśnienie, siła) jest zmiana fazy sygnału optycznego propagowanego w układzie pomiarowym, którą można opisać następującym równaniem [14]:

$$\varphi = \frac{4\pi \cdot n \cdot L}{\lambda}, \quad (2.9)$$

gdzie: n_{eff} – współczynnik załamania obszaru pomiędzy zwierciadłami, λ – długość fali źródła promieniowania, L – odległość pomiędzy zwierciadłami.

Obecnie na rynku największą popularnością cieszą się układy pomiarowe bazujące na interferometrii światła białego (np. produkty firmy FISO). Ogólna zasada działania samych czujników jest taka sama, jak opisywana powyżej. Różnica polega na sposobie odczytu informacji o mierzonej wielkości fizycznej zakodowanej w sygnale optycznym. Zastosowanie szerokopasmowego źródła promieniowania powoduje, iż poza zerowym rzędem prążków występuje interferencja destruktywna. Wskutek wielokrotnych odbić światła pomiędzy zwierciadłami rezonator F-P odbija wstecznie wybraną długość fali, zmodulowaną przez wielkość mierzona (długością wnęki F-P). Odległość pomiędzy zwierciadłami stanowi całkowitą wielokrotność długości fali odbitej, która zmienia się na skutek odkształceń mechanicznych oraz cieplnych przetwornika.

W układach pomiarowych firmy FISO wielkość mierzona jest dekodowana przez analizator rejestrujący zmiany długości fali pochodzącej od czujnika z wykorzystaniem tzw. cross-koleratora oraz linijki CCD. Sygnał każdego piksela matrycy CCD osiąga maksimum przy innej określonej długości fali pochodzącej z wnęki interferometru F-P, reprezentując określoną wartość tej długości. Zależność ta jest liniowa oraz niezależna od tłumienia światła w układzie, a także fluktuacji źródła promieniowania [22].

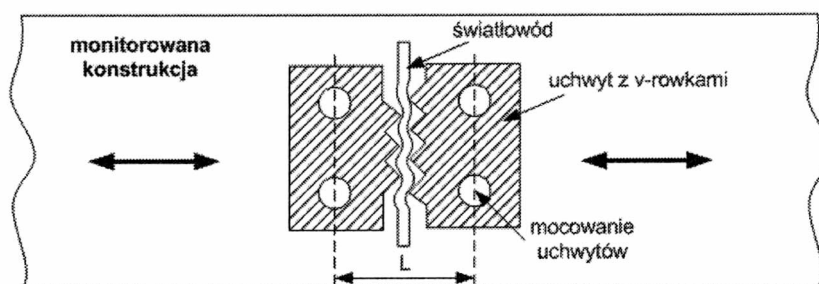
2.3.3 Czujniki z modulacją amplitudy fali świetlnej

Światłowodowe czujniki amplitudowe (zwane również natężeniowymi) wykorzystują zjawisko modulacji podstawowego parametru fali świetlnej jakim jest amplituda sygnału. Mierzona wielkość fizyczna oddziałuje na głowicę czujnikową wywołując zmiany natężenia sygnału świetlnego proporcjonalne do zmian sygnału pomiarowego [12]. Przetworniki amplitudowe charakteryzują się prostotą budowy, możliwością bezstykowego przetwarzania sygnału, w wybranych aplikacjach stosunkowo dużą dokładnością przetwarzania oraz względnie niską ceną. Czujniki te bazują przede wszystkim na zjawiskach odbicia, zmianie transmisji (sprzężenia) sygnału świetlnego, a także mikrougięciach światłowodu. Wszystkie te zjawiska powodują stratę mocy sygnału świetlnego, która jest propagowana od źródła światła poprzez głowicę pomiarową do detektora.

Największe zastosowanie czujników amplitudowych w monitorowaniu stanu technicznego konstrukcji znalazły czujniki mikrougięciowe. Są one stosowane przede wszystkim do pomiarów odkształceń i przemieszczeń [23, 24, 25, 26, 27]. Pozostałe typy przetworników, w tym układy odbiciowe oraz transmisyjne, stosowane są przede wszystkim do pomiarów odległości, wychyleń, drgań i innych wielkości fizycznych, które mogą być w sposób pośredni z nich wyznaczone [14, 28, 29, 30, 31].

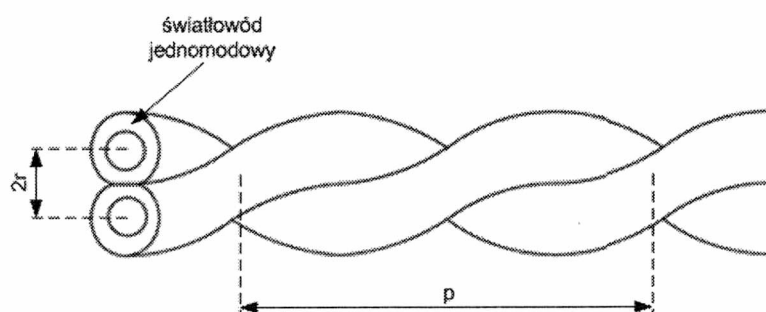
Czujniki mikrougięciowe (ang.: Microbending Sensors, MBS) należą do grupy czujników amplitudowych, w których zginanie światłowodu powoduje powstanie w nim strat propagowanego promieniowania świetlnego. Tłumienie światła w zdeformowanym włóknie światłowodowym, stanowiącym głowicę czujnika, wynika z obecności mikrougięć. Wprowadzone w sposób celowy deformacje powodują naruszenie warunku całkowitego wewnętrznego odbicia światła na granicy rdzeń-płaszcz, przez co część mocy optycznej fali świetlnej propagowanej w głowicy czujnika wypromieniowuje na zewnątrz światłowodu [23]. Przetworniki mikrougięciowe są typowymi czujnikami punktowymi, jednak zastosowanie do analizy sygnałów urządzeń typu OTDR pozwala na tworzenie łańcuchów pomiarowych złożonych z kilku, kilkunastu czujników (w zależności od zasięgu i dynamiki pomiarów urządzenia).

Mikrougięcia w stosowanych przetwornikach pomiarowych wymuszane są na różne sposoby. W pierwszym z nich włókno światłowodowe jest umieszczone pomiędzy dwoma pofałdowanymi płytkami (np. w postaci periodycznych V-rowków) [26]. Przesunięcie pofałdowanych płytek pod wpływem odkształceń monitorowanej konstrukcji powoduje ściskanie lub poluzowanie światłowodu, co odpowiednio zwiększa bądź też zmniejsza lokalnie tłumienie światłowodu (Rys. 2.7).



Rys. 2.7. Idea punkowego czujnika mikrougięciowego z v-rowkami (na podst. [26]).

Innym typem czujnika mikrougięciowego jest przetwornik typu twisted fiber. Głowicę czujnika stanowi światłowod jednomodowy, który spleciony jest sam ze sobą [23]. Budowa takiego czujnika przedstawiona została poniżej (Rys. 2.8).



Rys. 2.8. Budowa głowicy mikrougięciowej (na podst. [23]).

Zmiany tłumienia głowicy wykorzystywane do pomiarów deformacji pojawiają się na skutek działania sił rozciągających. Zależność tłumienia głowicy mikrougięciowej typu twisted fiber w funkcji promienia ugięcia światłowodu jest opisana zależnością [23]:

$$\Delta\alpha(R) = a \cdot \frac{\exp(-b \cdot R)}{\sqrt{R}}, \quad (2.10)$$

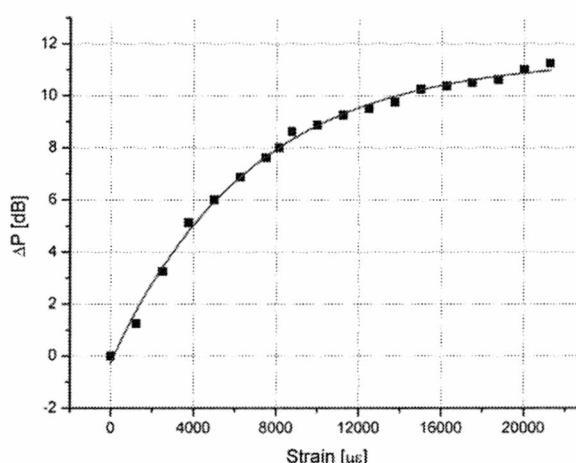
dla:

$$R = \frac{I}{r \cdot (2\pi)^2} \quad (2.11)$$

oraz:

$$I = \sqrt{p^2 + (2\pi r)^2}, \quad (2.12)$$

gdzie: R – promień ugięcia światłowodu, I – dł. światłowodu na okres deformacji, p – okres deformacji, r – połowa odległości między osiami światłowodów, a , b – stałe.



Rys. 2.9. Zmiana mocy optycznej propagowanej w układzie pomiarowym z czujnikiem mikrougięciowym w funkcji odkształcenia czujnika [32].

Na rysunku powyżej (Rys. 2.9) przedstawiona została charakterystyka odkształceniowa głowicy wykonanej ze światłowodu jednomodowego o średnicy rdzenia $\Phi=10\ \mu\text{m}$ i gęstości spleceń wynoszącej 200 [spleceń/metr]. Zauważyć należy, iż tłumienie głowicy maleje wraz z jej wydłużeniem, czyli pozornie wzrasta moc sygnału rejestrowanego przez fotodetektor. Spowodowane jest to zmniejszeniem deformacji włókien (zmniejszenie tłumienia odcinka światłowodu stanowiącego czujnik) w skutek ich wydłużenia.

W przypadku głowic mikrougięciowych bardzo ważne znaczenie ma właściwy dobór parametrów konstrukcyjnych głowicy (długości ramienia pomiarowego i ilości przepleceń światłowodów na jednostkę długości), pozwalających na detekcję deformacji rzędu pojedynczych $\mu\epsilon$. Komercyjne czujniki mikrougięciowe firmy OSMOS pozwalają na pomiar odkształceń z rozdzielczością 0,001 mm oraz dokładnością rzędu 0,002 mm w zakresie częstotliwości próbkowania do 100 Hz. Dostępne długości baz pomiarowych wynoszą od 10 cm do 10 m [25].

Największe problemy w czujnikach mikrougięciowych związane są z uzyskaniem wysokiej powtarzalności oraz małej histerezy pomiarów. Wynika to ze stosowania na pokrycia światłowodów, stanowiących głowice pomiarowe, materiałów polimerowych. Powłoki te wykazują tendencję do pękania nawet w temperaturach pokojowych, co może powodować relaksację światłowodu a tym samym zwiększa rozrzut uzyskiwanych wyników pomiarowych [26].

2.3.4 Czujniki rozłożone

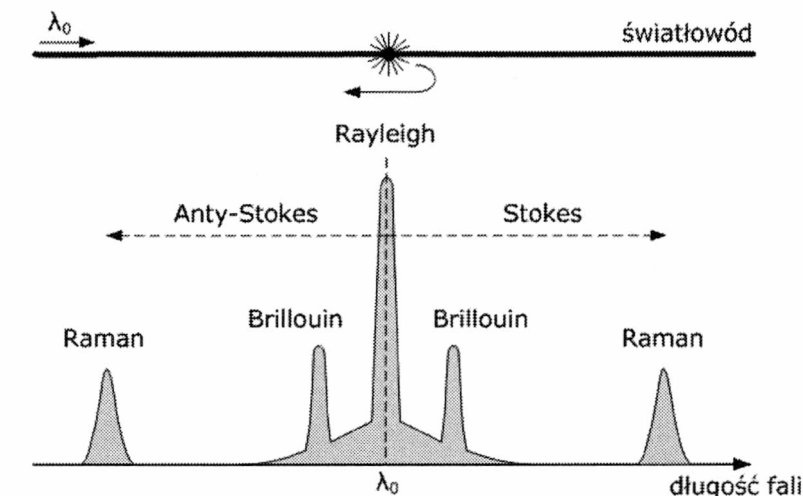
Stosowane coraz częściej systemy czujników rozłożonych stanowią odrębną grupę w klasyfikacji ogólnej, którą trudno jest jednoznacznie przypisać do grup sensorów z modulacją długości fali, bądź też amplitudy. Czujniki rozłożone współdziałają z reflektometrami optycznymi (ang.: Optical Time Domain Reflectometry, OTDR), a poprzez analizę sygnałów wstecznie rozproszonych pozwalają na wyznaczenie rozkładów przestrzennych (po długości czujnika) mierzonych wielkości fizycznych oraz ich zmian w czasie [28].

W systemach rozłożonych wykorzystywane są zjawiska rozpraszania światła propagowanego w głowicach pomiarowych. Największym uznaniem w obszarze monitorowania stanu technicznego konstrukcji, związanym przede wszystkim z dużymi dokładnościami mierzonych wartości fizycznych oraz szerokimi możliwościami aplikacyjnymi, cieszą się systemy bazujące na dwóch nieliniowych zjawiskach: rozpraszaniu Brillouina oraz rozpraszaniu Ramana (Rys. 2.10). Spotykane są również układy oparte na zjawisku rozpraszaniu Rayleigha (standardowe OTDR-y), jednakże przeniesione wprost z techniki pomiarowej, wykorzystywanej do analizy jakościowej światłowodowych sieci telekomunikacyjnych, nie znalazły zbyt szerokiego zastosowania w technice pomiarów wielkości fizycznych.

Rozpraszanie Ramana oraz Brillouina są to zjawiska występujące za każdym razem, kiedy mamy do czynienia z transmisją sygnału świetlnego w światłowodzie. Ponieważ ograniczają one maksymalną moc optyczną propagowaną światłowodem, są one bardzo niekorzystne z punktu widzenia transmisji sygnałów telekomunikacyjnych. Zwiększenie mocy wprowadzanej do włókna powoduje nieliniowy wzrost wartości na jego końcu, a tym samym stosunek sygnał/szum się zmniejsza. Jednakże możliwe jest wykorzystanie tychże zjawisk do pomiarów wielkości fizycznych, to jest temperatury oraz odkształceń.

Zjawisko spontanicznego rozpraszania Ramana (ang.: Spontaneous Raman Scattering) polega na rozpraszaniu propagowanych fotonów na drgających cząsteczkach, które to drgania są wynikiem lokalnych zmian temperatury światłowodu. Częstota nowej fali świetlnej jest przesunięta o częstotliwość charakterystycznych drgań całych cząsteczek, których elektrony wzbudzała fala podstawowa λ_0 (tzw. rozpraszanie nieelastyczne). Na sku-

tek rozpraszania w widmie obok pasma Rayleigha o niezmięnionej długości λ_0 powstają także dwa dodatkowe pasma, tzw. fale Stokesa oraz anty-Stokesa (Rys. 2.10).

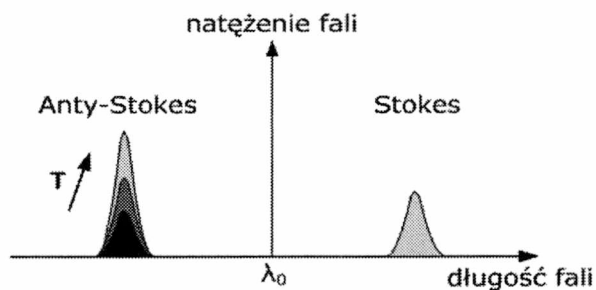


Rys. 2.10. Rozpraszanie światła w światłowodzie (na podst.: [10]).

Intensywność fali anty-Stokesa silnie zależy od temperatury, natomiast składowej o niższej częstotliwości (fala Stokesa) już nie (Rys. 2.11). W celu wyznaczenia zmian temperatury wykorzystuje się stosunek natężenia wstecznie rozproszonych fal Stokesa (I_{RS}) i anty-Stokesa (I_{RaS}), który jest funkcją temperatury bezwzględnej i jest opisywany równaniem [14, 33]:

$$R_{rm}(T) = \frac{I_{RaS}}{I_{RS}} = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{aS}} \right)^4 \cdot \exp \left(- \frac{h \cdot c \cdot \Delta \nu}{k \cdot T} \right), \quad (2.13)$$

gdzie: λ_S – długość fali Stokesa, λ_{aS} – długość fali anty-Stokesa, h – stała Plancka, c – prędkość światła, $\Delta \nu$ – przesunięcie częstotliwości od częstotliwości podstawowej (pompy), k – stała Boltzmanna, T – temperatura bezwzględna.



Rys. 2.11. Rozpraszanie Ramana: zmiana natężenia fali anty-Stokesa pod wpływem zmian temperatury otoczenia (na podst.: [10]).

Dostępne na rynku komercyjne systemy pomiarowe (np. firmy SensorNet) umożliwiają pomiar temperatury w zakresie od $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (w zależności od zastosowanego rodzaju czujnika) z rozdzielczością pomiarową dochodzącą do $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ i dokładnością

0,1 °C. Rozdzielczość przestrzenna, czyli dokładność lokalizacji zdarzeń w światłowodzie wynosi nawet 0,5 m, a maksymalna długość głowicy pomiarowej to 30 km. Pozwala to na uzyskanie nawet 60.000 punktów pomiaru temperatury w jednej głowicy czujnikowej. Minimalny czas pomiaru wynosi 10 sekund, jednakże dokładność pomiaru temperatury jak i rozdzielczość przestrzenna jest silnie od niego zależna. Wynika to z faktu, iż poziom mocy wstecznego rozpraszania Ramana jest ok. trzy rzędy mniejszy w porównaniu do mocy wstecznego rozpraszania Rayleigha [12].

Z kolei w zjawisku wymuszonego rozpraszania Brillouina (ang.: Stimulated Brillouin Backscattering, SBS) dochodzi do interakcji propagowanej fali świetlnej z falą akustyczną w światłowodzie. Na skutek zjawiska fotoelastycznego wspomniana fala akustyczna generuje lokalne zmiany współczynnika załamania, tworząc poruszające się z prędkością dźwięku w światłowodzie (V_A) siatki (ang.: index grating). Niewielka część promieniowania optycznego prowadzonego w ośrodku jest rozpraszana na wspomnianych lokalnych zmianach współczynnika załamania, co prowadzi do przemiany częstotliwości i odwrócenia kierunku rozchodzenia się fali świetlnej (zjawisko występuje wyłącznie w kierunku wstecznym). Rozproszone w ten sposób światło zwane jest falą Stokes'a lub też rozproszona falą Brillouin'a. Inaczej mówiąc foton ze źródła promieniowania jest przekształcany w foton o innej częstotliwości oraz fonon, który dodaje się do fali akustycznej [34].

Przesunięcie częstotliwości wymuszonego rozpraszania Brillouina (f_b), względem częstotliwości podstawowej (wymuszającej), jest określane równaniem [35]:

$$f_b = \frac{2 \cdot n \cdot V_a}{\lambda}, \quad (2.14)$$

gdzie: λ – długość fali pompy (podstawowej), n – współczynnik załamania rdzenia, V_a – prędkość fali akustycznej w światłowodzie.

Przyjmując dla światłowodu kwarcowego następujące wartości: $v_a=5,96$ km/s oraz $n = 1,45$, to dla systemów pracujących w trzecim oknie telekomunikacyjnym ($\lambda=1550$ nm), otrzymuje się przesunięcie częstotliwości Brillouina rzędu $f_b=11,2$ GHz. Lokalne zmiany odkształcenia lub/i temperatury powodują zmiany wartości współczynnika załamania światłowodu (n) oraz prędkości rozchodzenia się w nim fali akustycznej (v_a), wymuszając tym samym przesunięcie częstotliwości rozpraszania Brillouina. Analizując wartość przesunięcia częstotliwości fali Stokesa oraz czas dotarcia impulsu pomiarowego do detektora, możliwe jest uzyskanie informacji na temat lokalizacji oraz zmiany mierzonych wielkości fizycznych. Jednakże, podobnie jak zostało opisane wcześniej w przypadku czujników FBG, system pomiarowy z podłączonym jednym światłowodem (czujnikiem) nie jest w stanie samoistnie rozróżnić równoczesnego wpływu temperatury i odkształceń. Dlatego też w przypadku pomiaru odkształceń należy stosować referencyjne czujniki temperatury, które są odseparowane mechanicznie od monitorowanego obiektu, będąc z nim równocześnie w kontakcie termicznym. Analogicznie w przypadku pomiaru tylko

temperatury, konieczne jest zastosowanie głowic czujnikowych bez wprowadzonych naprężeń wstępnych (tzw. luźne włókno).

W związku z powyższym, odpowiedź czujnika (zmiana częstotliwości przesunięcia Brillouina) na czynniki zewnętrzne można opisać zależnością [36]:

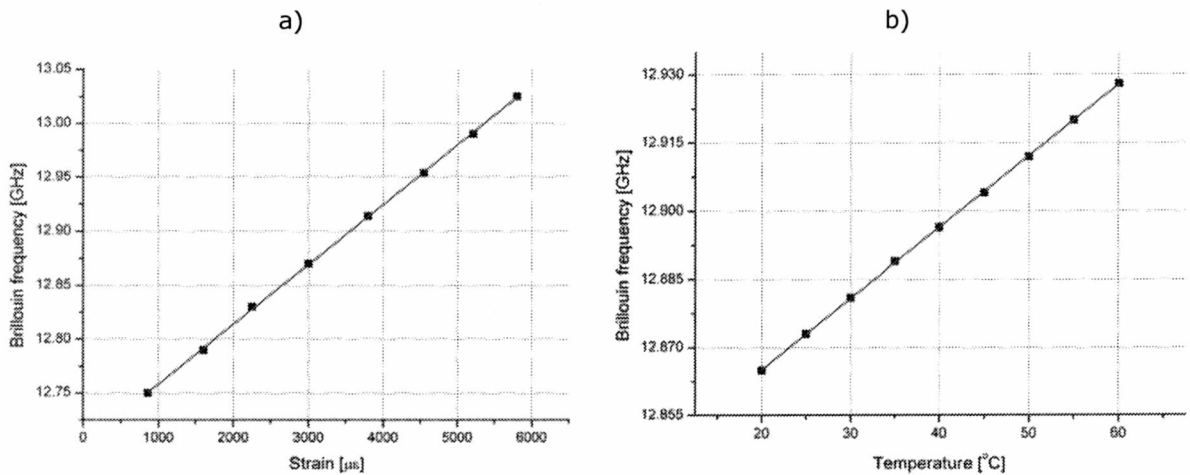
$$\Delta f_b(\varepsilon, T) = C_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + C_T \cdot \Delta T, \quad (2.15)$$

gdzie: C_ε – czułość odkształceniowa, C_T – czułość temperaturowa; parametry charakterystyczne dla różnych rodzajów włókna światłowodowego oraz długości fali.

Należy podkreślić, iż przebieg zmian częstotliwości Brillouina, zarówno w funkcji temperatury jak i odkształceń, ma charakter liniowy, a współczynniki częstotliwościowe charakteryzują poniższe wartości [37]:

$$C_T = \frac{\partial f_b}{\partial T} = 1,590 \text{ MHz/}^\circ\text{C}, \quad (2.16)$$

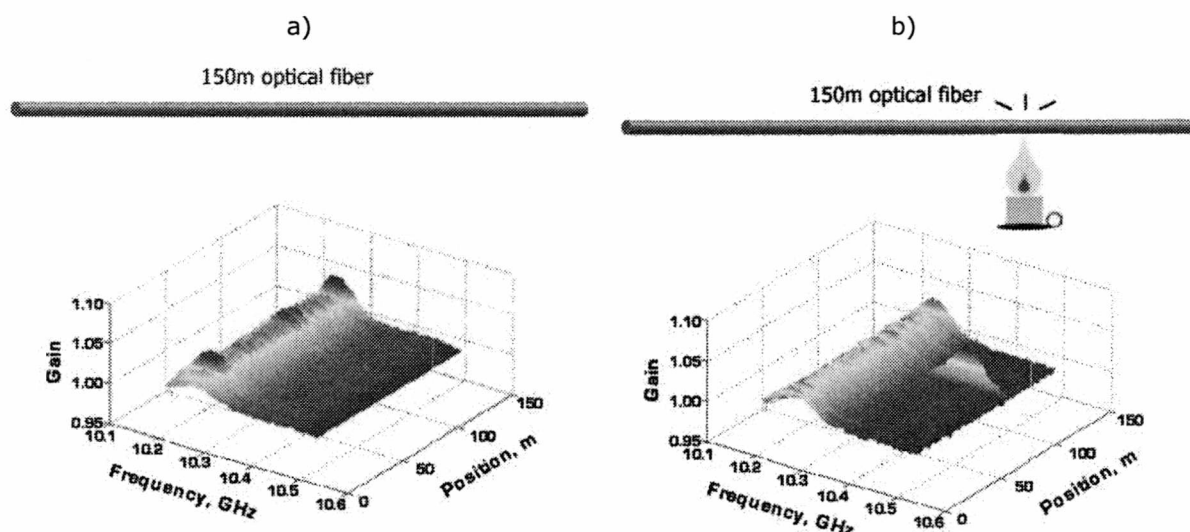
$$C_\varepsilon = \frac{\partial f_b}{\partial \varepsilon} = 0,0557 \text{ MHz/}^\circ\text{C}. \quad (2.17)$$



Rys. 2.12. Zależność zmian częstotliwości wymuszonego rozpraszania Brillouina pod wpływem temperatury (a) oraz odkształceń (b) (na podst. [37]).

Przykładowe charakterystyki zmian częstotliwości wymuszonego rozpraszania Brillouina, w funkcji zmian temperatury oraz odkształcenia, przedstawiono powyżej (Rys. 2.12). Ponieważ wstecznie propagowany rozproszony sygnał Brillouina jest bardzo słaby (moc rozpraszania Brillouina jest mniejsza od mocy rozpraszania Rayleigha o ok. 20 dB), dlatego też w komercyjnych systemach pomiarowych stosowane są m.in. układy detektorów koherentnych. Analiza sygnału polega zatem na pomiarze różnicy częstotliwości sygnałów, a nie mierzeniu częstotliwości samych sygnałów. W typowej konfiguracji systemu wykorzystuje się dwa lasery, umiejscowione po przeciwnych stronach głowicy pomiarowej. Jednym z nich jest źródło impulsowe (światło pompy), a drugim źródło emitujące falę ciągłą o modulowanej częstotliwości fali. Kiedy różnica częstotliwości pomiędzy promieniowaniem emitowanym przez obydwa źródła światła jest równa częstotliwości Brillouina,

louina, następuje wówczas silne wzmocnienie sygnału, który jest analizowany w funkcji czasu, podobnie jak w standardowych OTDR-ach. Stopień wzmocnienia zależy od dopasowania pomiędzy różnicą częstotliwości dwóch źródeł oraz lokalnej zmianie częstotliwości (wywołanej odkształceniem). Analizując przesunięcie częstotliwości można wyznaczyć lokalne zmiany odkształceń bądź temperatury (Rys. 2.13).



Rys. 2.13. Przykładowa zależność zmiany częstotliwości Brillouin'a pod wpływem lokalnej zmiany temperatury światłowodu przed (a) i po jego podgrzaniu (b) [38].

Komercyjne systemy pomiarowe, które są obecnie na rynku (np. firmy Omnisens, OZoptic), umożliwiają pomiary na czujnikach o długościach dochodzących do 100 km z rozdzielczością przestrzenną wynoszącą nawet 10 cm. Pomiar temperatury jest możliwy w zakresie od $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (w zależności od zastosowanego rodzaju czujnika) z rozdzielczością pomiarową dochodzącą do $0,005\text{ }^{\circ}\text{C}$ i dokładnością $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, natomiast pomiar odkształceń może być realizowany z dokładnością $2\text{ }\mu\epsilon$, przy rozdzielczości $0,01\text{ }\mu\epsilon$. Minimalny czas pomiaru może wynosić nawet 1 sekundę, jednakże dokładność pomiaru jak i rozdzielczość przestrzenna jest silnie zależna od czasu trwania akwizycji sygnału wstecznie rozproszonego [39].

2.4 Korzyści wynikające z monitorowania konstrukcji

Monitoring stanu technicznego obiektów i konstrukcji technicznych w ostatnich latach staje się coraz bardziej popularny. Powyższy trend nie jest związany tylko z modą na budowanie nowoczesnych obiektów typu Smart. Jest on przede wszystkim wynikiem rzeczywistych i wymiernych skutków jakie wynikają z ciągłego monitorowania odpowiedzialnych obiektów technicznych, które mają znaczenie kluczowe dla bezpieczeństwa na obszarach objętych ich oddziaływaniem. Niestety awarie i katastrofy obiektów technicznych

towarzyszą człowiekowi od zawsze. Jak wykazują raporty, publikowane m.in. przez Główny Urząd Nadzoru Budowlanego, ich liczba wzrasta z roku na rok. Zarówno błędy popełnione na etapie projektowania oraz wznoszenia konstrukcji, ale również niewłaściwa eksploatacja obiektu, zła jakość materiałów budowlanych, a także zagrożenia ze strony ekstremalnych i nieprzewidzianych zjawisk przyrodniczych, mogą doprowadzić do poważnej i nieodwracalnej w skutkach katastrofy. Niejednokrotnie, nawet niewielkie lokalne uszkodzenie obiektu, może przyczynić się do poważnej awarii, co niesie za sobą wymierne skutki ekonomiczne i społeczne (utrata życia mieszkańców na obszarach objętych katastrofą, wypłata odszkodowań, odbudowa zniszczonej infrastruktury i in.), jak również straty dla środowiska naturalnego w przypadku katastrof ekologicznych (np. składowiska niebezpiecznych odpadów chemicznych) [40]. Przeprowadzane *post factum* analizy przyczyn uszkodzeń konstrukcji i obiektów technicznych prowadzą do wniosków, iż nie jesteśmy w stanie całkowicie ich przewidzieć i wyeliminować, a skupić się należy na sposobach ostrzegania o pogarszającym się stanie obiektu i zwiększeniu długoterminowej niezawodności pracy tychże obiektów („profilaktyka zamiast leczenia”) [41].

Ogólne cele jakie stawiane są systemom monitorowania konstrukcji sprowadzić można do tego, by:

- rejestrować zachowanie się konstrukcji/obektu technicznego w całym okresie eksploatacji (weryfikacja założeń i modeli przyjętych na etapie projektowania oraz określenie wytrzymałości poszczególnych elementów),
- zwiększać bezpieczeństwo konstrukcji/obektu podczas użytkowania (ciągły pomiar umożliwia kontrolowanie pracy konstrukcji w czasie, pod wpływem zmieniających się obciążeń),
- informować o pojawiających się zagrożeniach ze strony samej konstrukcji/obektu (szacowanie degradacji technicznej, a także prognozowanie żywotności obiektu),
- wspierać prace remontowe (optymalizacja planowania remontów i napraw),
- powiększać wiedzę o rzeczywistym zachowaniu się obiektu.

Korzyści wynikające z ciągłego (ewentualnie okresowego) monitorowania można zatem podzielić na kilka kategorii. Pierwszą z nich można określić mianem nowoczesnego zarządzania konstrukcją (ang.: Structural Management). Najbezpieczniejsze i najtrwalsze konstrukcje to zazwyczaj te, które są dobrze zarządzane, a monitorowanie ich stanu technicznego odgrywa w tym procesie znaczącą rolę. Dane pomiarowe uzyskane z monitorowania mogą być wykorzystywane do optymalizacji funkcjonowania, konserwacji, napraw i ewentualnych wymian elementów konstrukcyjnych. Monitoring może przedłużyć okres bezpiecznego używania obiektów, umożliwia odkrycie zagrożeń w konstrukcji, które mogą nie być wykryte w trakcie oględzin lub/i modelowania, czyli zanim będzie za późno. Ponadto pozwala na racjonalne zarządzanie środkami finansowymi poprzez wymianę w odpowiednim czasie uszkodzonych elementów (drobne naprawy są tańsze od

wybudowania np. zawalonego obiektu na nowo), a nawet zmniejszenie kosztów ubezpieczenia. Dodatkowo wyłączenie z użytkowania strategicznego z ekonomicznego punktu widzenia obiektu, może mieć wpływ na inne obszary w gospodarce regionu [42].

Kolejną równie istotną korzyścią wynikającą z regularnego monitorowania konstrukcji jest zwiększenie bezpieczeństwa (ang.: Increase of Safety) [42]. Wadliwe działanie (nie-sprawność) obiektów technicznych może mieć poważne konsekwencje dla ludzi i środowiska. Ciągły i niezawodny monitoring może pomóc w zagwarantowaniu bezpieczeństwa ludzi oraz obiektów, poprzez redukcję nieokreśloności związanej z występowaniem ukrytych wad materiałowych lub konstrukcyjnych. Dzięki temu wzrasta pewność długoterminowej niezawodności (gwarancja jakości).

Nie mniej ważną dziedziną jest doskonalenie wiedzy o monitorowanej konstrukcji (ang.: Knowledge Improvement). Nauczenie się zachowania obiektów w warunkach rzeczywistych umożliwia weryfikację skomplikowanych modeli numerycznych, pozwala na ich dokładne zrozumienie, a to z kolei prowadzi do ich lepszego projektowania w przyszłości. Dodatkowo pozwala to na zmniejszania kosztów związanych z budową nowych obiektów, zwiększenia ich bezpieczeństwa, niezawodności i trwałości [10].

Podsumowując, stosowanie systemów monitorujących stan techniczny obiektów technicznych, takich jak wysokociśnieniowe zbiorniki paliwa, powoduje zwiększenie bezpieczeństwa ich eksploatacji w sposób bezpośredni (m.in. poprzez kontrolę stopnia degradacji powłoki nośnej, wykrywanie defektów, itp.), ale równocześnie poprzez „inteligentne zarządzanie” (oparte na wiedzy o obiekcie), powoduje zwiększenie bezpieczeństwa w sposób pośredni.

2.5 Zestawienie systemów pomiarowych

Porównanie różnego rodzaju czujników światłowodowych sprowadza się do porównania przede wszystkim ich zasady działania (różne typy modulacji fali świetlnej przez czynniki zewnętrzne), mierzonej wielkości fizycznej, rodzaju multipleksacji czy też długości głowicy pomiarowej. Szerszy obraz różnorodności czujników światłowodowych można uzyskać poprzez porównanie kompletnych systemów pomiarowych, bazujących na poszczególnych rodzajach czujników OFS.

Na rynku obecnie znaleźć można wiele rodzajów jednostek pomiarowych oraz wiele czujników o bardzo różnorodnych zastosowaniach aplikacyjnych. W poniższej tabeli (Tab. 2.2) zestawione zostały zasadnicze parametry techniczne dla kilku wybranych światłowodowych systemów pomiarowych, które są najczęściej stosowane w obszarze monitorowania stanu technicznego konstrukcji.

Jako że, zarówno producentów układów pomiarowych (ang.: Signal Processing Unit, SPU) jak i czujników jest wielu, zdecydowano, że do zestawienia wybranych zostało zale-

dwie kilku z nich, których sprzęt pomiarowy cechuje się najwyższymi parametrami z zakresu częstotliwości próbkowania sygnału oraz dokładności pomiarowej. Dla porównania wybrano systemy pomiarowe bazujące na czujnikach typu: FBG (światłowodowe siatki Bragga), EFPI (interferometry z wnęką Fabry-Perota), mikrougięciowe, SOFO (niskokoherentne interferometry światłowodowe), a także układy z rozpraszaniem Brillouina oraz Ramana.

Tab. 2.2. Zestawienie parametrów technicznych dla wybranych rodzajów systemów bazujących na czujnikach światłowodowych.

Typ czujnika	FBG ¹	EFPI ²	Mikrougięciowy ³	SOFO ⁴	Brillouin ⁵	Raman ⁶
Mierzona wielkość fizyczna	ϵ , T	ϵ , T	ϵ	ϵ	ϵ , T	T
Dokładność pomiarów	$\pm 1 \mu\epsilon$ $\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\pm 1 \mu\epsilon$ $\pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\pm 1 \mu\epsilon$	$\pm 1 \mu\epsilon$	$\pm 2 \mu\epsilon$ $\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$
Częstotliwość próbkowania	<500 kHz	<1 kHz	<100 Hz	<20 kHz	>1 Hz	>0,1 Hz
Typ czujnika	Punktowy	Punktowy	Punktowy	Punktowy	Rozłożony	Rozłożony
Typ modulacji	Długość fali	Faza sygnału	Amplituda sygnału	Faza sygnału	Długość fali	Amplituda sygnału
Długość głowicy pomiarowej	0,01÷2 m	0,001÷0,1 m	0,01÷10 m	0,2÷20 m	do 100 km	do 30 km
Punkty pomiarowe na kanał	1÷40	1	1	1	2000 ⁷	2000 ⁷

¹ www.miconoptics.com

⁵ www.ozoptics.com

² www.fiso.com

⁶ www.smartec.ch

³ www.osmos-group.com

⁷ dla głowicy pomiarowej o długości 1 km i rozdzielczości przestrzennej 0,5 m

⁴ www.smartec.ch

Podsumowując, czujniki światłowodowe, w porównaniu do standardowych metod pomiarowych (tensometria oporowa, termopary), charakteryzują się szeregiem zalet. Są to między innymi:

- wysoka czułość pomiarowa (pomiar odkształceń z dokładnością: $1 \mu\epsilon$ oraz temperatury: $0,1 \text{ K}$),
- szerokie zakresy pomiarowe (odpowiednio przy pomiarach odkształceń i temperatury: $-3\% \dots 3\%$ oraz $-270 \dots +800 \text{ } ^\circ\text{C}$),
- izolacja galwaniczna z układem pomiarowym (iskrobezpieczeństwo),

- niewrażliwość na działanie pól E-M (możliwość pracy przy dużych poziomach zakłóceń elektromagnetycznych),
- możliwość pracy w trudnych warunkach (duże zapylenie, wysokie temperatury, wysokie ciśnienia)
- systemy pasywne (brak zasilania elektrycznego czujników),
- możliwość zdalnych pomiarów,
- mała waga i wymiary czujnika (łatwa integracja z monitorowanym obiektem)
- zintegrowany system telemetryczny (światłowód jest zarówno przetwornikiem jak i nośnikiem informacji),
- niskie tłumienie sygnału (możliwość tworzenia rozległych systemów pomiarowych),
- efektywność ekonomiczna (w przypadku rozległych systemów – w tym szczególnie w przypadku systemów rozłożonych - bardzo dobry stosunek ilości punktów pomiarowych do ceny punktu),
- duża różnorodność i prostota konstrukcji światłowodowych głowic pomiarowych.

Do wad systemów SHM bazujących na czujnikach światłowodowych można zaliczyć:

- stosunkowo wysoki koszt systemu z niewielką liczbą przetworników,
- wymagany jest wyższy poziom „kultury technicznej” w trakcie instalacji (m.in. zachowanie ostrożności przy instalacji kabli pasywnych oraz czujników, zapewnienie czystości połączeń, itp.),
- trudniejsza naprawa uszkodzonych kabli pasywnych (wymagane jest specjalistyczne oprzyrządowanie – tzw. spawarka światłowodowa).

2.6 Zastosowania czujników światłowodowych do monitorowania stanu technicznego wybranych konstrukcji

Możliwość aplikacji systemów do monitorowania stanu technicznego konstrukcji dotyczy obiektów nowopowstających, jak również już istniejących. Odpowiednio wczesne wykrywanie prekursorów uszkodzeń (w możliwie wczesnym stadium rozwoju), pozwala na podjęcie odpowiednich działań na zabezpieczających przed zagrożeniem oraz sprawdzanie stanu procesów degradacyjnych konstrukcji, a ponadto również optymalizację prac remontowych. Jak już wspomniano w punkcie 2.2, czujniki światłowodowe znajdują zastosowanie w monitorowaniu obiektów technicznych z wielu obszarów, w tym między innymi szeroko pojętej inżynierii lądowej, energetyki, przemysłu, jak również sprawdzają się w aplikacjach typowo laboratoryjnych. Poniżej przedstawiono krótko wybrane aplikacje systemów SHM bazujących na czujnikach światłowodowych.

2.6.1 Monitorowanie budynków

Zapotrzebowanie na monitorowanie stanu strukturalnego konstrukcji budowlanych, w tym również budynków mieszkalnych oraz użytkowych (m.in. wieżowców, hal widowiskowo-sportowych, wystawowych, handlowych, dworcowych, produkcyjnych, szpitali, budynków elektrowni, itp.), związane jest z rosnącą świadomością osób zarządzających ogólnie pojętym bezpieczeństwem. Stosowane przez konstruktorów nowoczesne materiały konstrukcyjne (tj. stal, beton, kompozyty), coraz bardziej innowacyjne pomysły architektoniczne, a zarazem coraz większy stopień wyężenia konstrukcji (elementów) budowlanych sprawia, iż koniecznym staje się stosowanie zaawansowanych systemów monitorowania SHM, które umożliwiają poprawną ocenę ich stanu technicznego. Konieczność stosowania „urządzeń do stałej kontroli parametrów istotnych dla bezpieczeństwa konstrukcji, takich jak: przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w konstrukcji” została potwierdzona przez ekspertów oraz wdrożona przez organy ustawodawcze (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12-go marca 2009 r.).

Systemy SHM stosowane w budynkach pozwalają na szybką ocenę stanu konstrukcji, natomiast dane wynikające z realizowanych pomiarów są wykorzystywane również do poprawy jego funkcjonowania, utrzymania (np. odśnieżanie dachu w momencie, kiedy jest rzeczywista potrzeba), przeprowadzania remontów i napraw opartych na wiarygodnych i obiektywnych informacjach. Kontrolowanie postępujących procesów degradacyjnych na poziomie strukturalnym oraz ich porównanie z wartościami projektowymi pozwala nie tylko na jakościową, ale również ilościową ocenę stopnia degradacji całej konstrukcji, co pozwala skutecznie zapobiegać także katastrofom budowlanym.

Wadliwe funkcjonowanie budynków mieszkalnych, wieżowców, czy też innych obiektów, w których gromadzą się ludzie, może mieć poważne konsekwencje. Oczywiście najpoważniejsze są błędy, kiedy mamy do czynienia z udziałem ofiar ludzkich. Jednakże nawet gdy nie ma utraty życia, powstają straty związane z częściowym lub całkowitym wyłączeniem uszkodzonego obiektu z eksploatacji. Skutki ekonomiczne odzwierciedlone są poprzez koszty odbudowy, jak również przez straty w innych (powiązanych) gałęziach gospodarki. Ponadto poznanie zachowania się budynków (szczególnie wieżowców) w rzeczywistych warunkach, przy rzeczywistych obciążeniach (w tym także meteorologicznych), pozwala na ich lepsze projektowanie w przyszłości. Może to prowadzić do tworzenia tańszych, ale zarazem bardziej wytrzymałych i bezpiecznych konstrukcji, cechujących się większą niezawodnością, wydajnością i bezpieczeństwem.

Ze względu dużą złożoność konstrukcji budowlanych, projektując system SHM, największa uwaga skupiona zostaje na najważniejszych elementach, których monitorowanie jest krytyczne z punktu bezpieczeństwa całej konstrukcji. W przypadku wieżowców, które budowane są na obszarach aktywnych sejsmicznie, są to najczęściej: fundamenty (pale), kolumny oraz ściany nośne, jak również rdzenie (jeżeli występują). Z kolei w przypadku

rozległych hal największą uwagę przykładają się do pomiarów wybranych elementów konstrukcji nośnej (słupy nośne oraz belki) oraz dachów. Monitorowanie stanu technicznego dachów ma szczególne znaczenie dla obiektów wznoszonych w strefach klimatycznych narażonych na częste i obfite opady śniegu. Jego zaleganie może być główną przyczyną katastrof budowlanych dla tego typu konstrukcji [10].

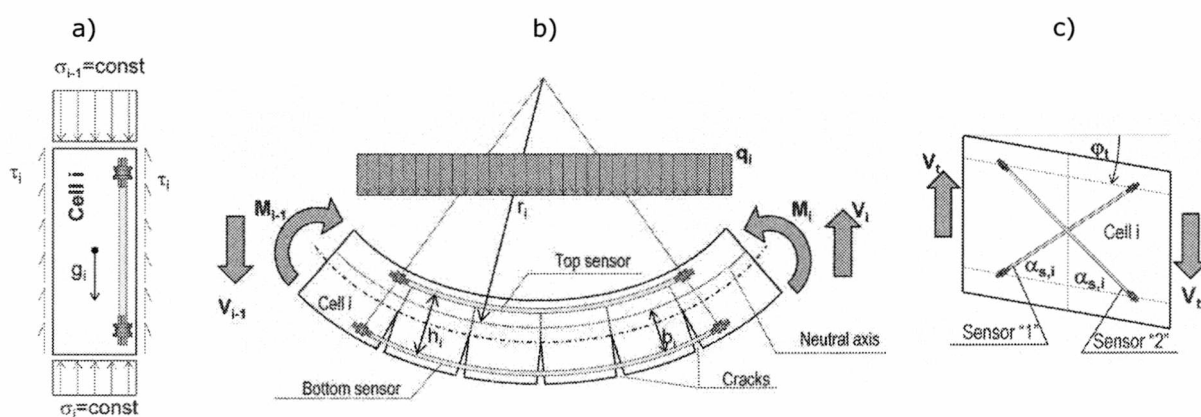
Monitorowanie konstrukcji, w tym również budynków, na poziomie strukturalnym (a nie materiałowym) wymaga zainstalowania w jej obrębie określonej ilości czujników, tak by możliwie dokładnie odwzorować jej zachowanie pod wpływem działających obciążeń zewnętrznych. Aby zoptymalizować kształt systemu SHM (w tym: liczbę i rodzaj stosowanych czujników, miejsca ich instalacji, zakresy mierzonych wartości, itp.), Inaudi oraz Gliści zaproponowali w swojej pracy [43] koncepcję zbliżoną do tradycyjnej metody elementów skończonych (ang.: Finite Element Method, FEM), określaną mianem FE-SHM. Idea FE-SHM, podobnie jak metoda elementów skończonych, zakłada podział monitorowanego obiektu na komórki, w obrębie których mierzone parametry fizyczne będą miały stałe (np.: odkształcenia przy ściskaniu i rozciąganiu, odkształcenia ścinające, krzywizna, przemieszczenia względne, temperatura, itp.). Wówczas, znając zachowanie poszczególnych komórek, przy pewnych założeniach można wnioskować o zachowaniu się całej monitorowanej struktury (konstrukcji). Kombinacja czujników w pojedynczej komórce określana jest mianem topologii czujników [10]. Zatem metoda FE-SHM przedstawia rozmieszczenie czujników na całym obiekcie (bądź też wybranym, krytycznym jego obszarze) tak, aby w najbardziej skuteczny, a zarazem racjonalny (od strony ekonomicznej) sposób przeprowadzać analizę jego stanu strukturalnego.

W zależności od rodzaju konstrukcji budowlanych oraz wybranych jego krytycznych punktów stosuje się różne topologie rozmieszczenia czujników na monitorowanym obiekcie. Wyróżnia się zatem topologie [10]:

- prostą (ang.: Simple Topology),
- równoległą (ang.: Parallel Topology),
- krzyżową (ang.: Crossed Topology).

W topologii prostej (Rys. 2.14a) stosowany jest pojedynczy czujnik, który zainstalowany jest równolegle do osi neutralnej komórki. Układ ten stosowany jest wówczas, gdy zakłada się, że komórka narażona jest głównie na występowanie siły ściskającej bądź też rozciągającej oraz nie występuje w niej zginanie. Wykorzystywana jest najczęściej do monitorowania kolumn, pali, kotw, słupów. Topologia prosta może być stosowana w formie łańcucha czujników (wiele czujników rozmieszczonych wzdłuż osi obiektu, na całej jego długości) lub rozproszonej (jeden czujnik na wybranym elemencie). Umożliwia monitorowanie takich parametrów jak przemieszczenie względne czy też odkształcenie średnie (na całej długości głowicy pomiarowej), a znając parametry materiałowe i geometryczne komórki również naprężenia normalne oraz siłę w przekroju.

Topologia równoległa (Rys. 2.14b) zakłada instalację co najmniej dwóch czujników równoległe do osi neutralnej komórki. Najczęściej stosowana jest elementach konstrukcyjnych narażonych na obciążenia zginające, które można spotkać w konstrukcjach mostowych, kolumnach, zaporach, tunelach, stropach, belkach nośnych, itp. Monitorowanymi parametrami zatem są: przemieszczenia, odkształcenie średnie, czy też krzywizna (jej promień). Podobnie jak w przypadku topologii prostej, znając parametry materiałowe można wyznaczyć naprężenia normalne oraz wartość siły w przekroju. Ponadto równoległa kombinacja czujników umożliwia ocenę pęknięć w konstrukcjach, w tym m.in.: czas wystąpienia, głębokość pęknięć, rozwarcie pęknięć, a w dłuższym przedziale czasu również ich propagację.



Rys. 2.14. Topologie instalacji czujników w systemach SHM: prosta (a), równoległa (b) oraz krzyżowa (c); koncepcja firmy SMARTEC, na podst. [10].

Ostatnia ze stosowanych topologii (krzyżowa, Rys. 2.14c) zakłada również stosowanie dwóch przetworników pomiarowych, które nachylone są pod określonym kątem względem osi naturalnych. Stosowana jest przede wszystkim w komórkach narażonych głównie na działanie sił ścinających (w wybranych punktach na mostach, zaporach, budynkach, itp.). Analiza uzyskanych wyników z pomiarów przemieszczeń poszczególnych czujników pozwala na wyznaczenie wartości średniego odkształcenia przy ścinaniu w monitorowanej komórce.

Ponadto metoda elementów skończonych w monitorowaniu konstrukcji budowlanych opisuje również dwa różne podejścia do zagadnienia monitoringu strukturalnego [10]. Pierwsze z nich, określane mianem monitoringu lokalnego, skupia się na pomiarach krytycznych elementów konstrukcji (np. słupów nośnych konstrukcji). W takim przypadku zainstalowane osiowo czujniki, w topologii prostej bądź równoległej, rejestrują deformacje słupów pod wpływem zmieniających się obciążeń, a następnie wyznaczane są ich odkształcenia. W kolejnym kroku przeprowadza się ocenę poziomu uzyskanych wartości przez ich porównanie z wartościami teoretycznymi (planowanymi na etapie projektowania) oraz z maksymalnymi dopuszczalnymi, wyznaczonymi np. poprzez modelowanie

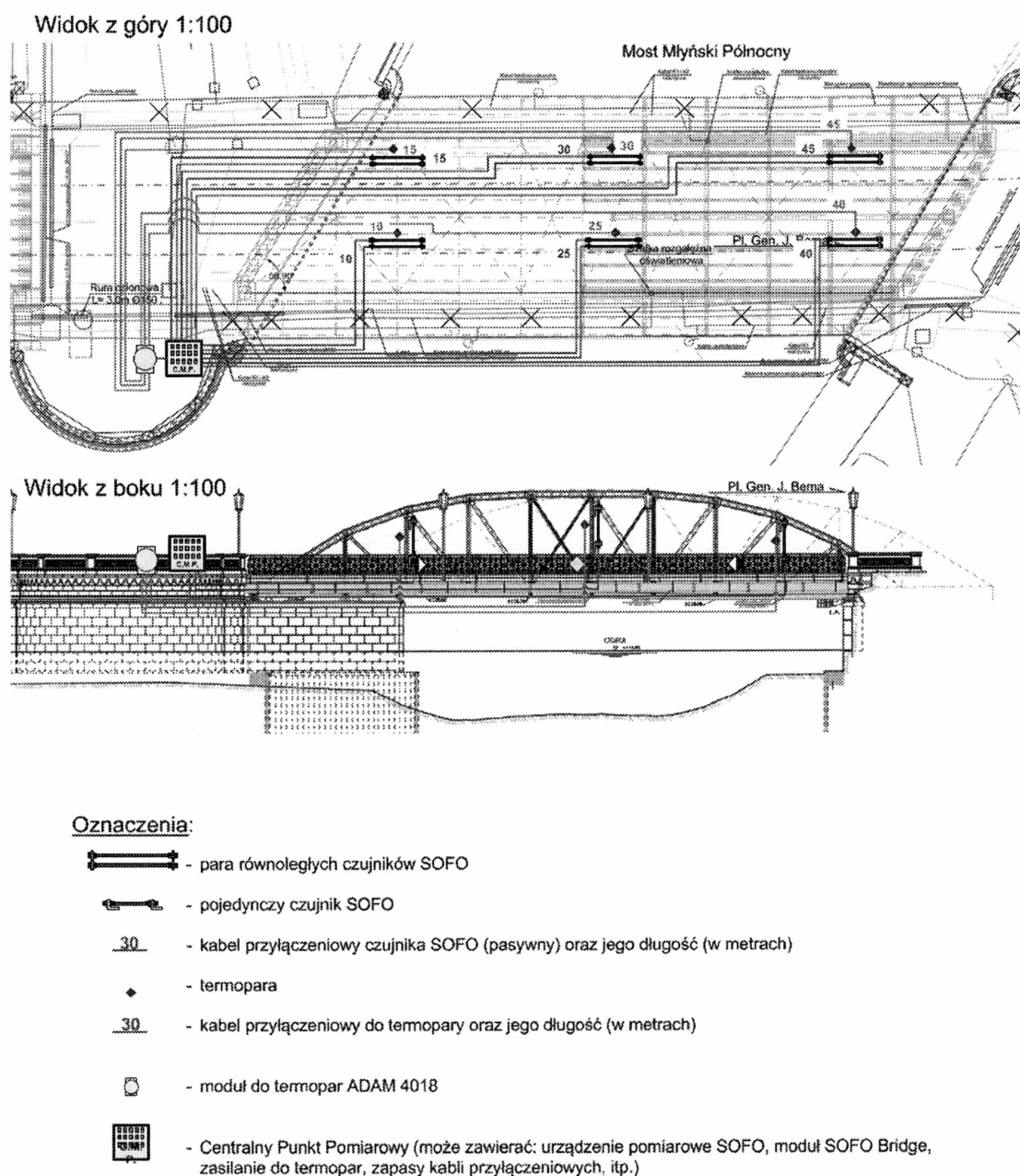
numeryczne. W drugim podejściu (tzw. monitoring globalny) analizowane są zależności pomiędzy poszczególnymi komórkami pomiarowymi, rozproszonymi na całym obiekcie. Dzięki temu możliwe jest np. wykrywanie nierównomiernego osiadania fundamentów konstrukcji budowlanej, pochylania kondygnacji, itp.

Jak już wspomniano wcześniej, światłowodowe systemy SHM przeznaczone do monitorowania budynków, najczęściej realizują pomiary odkształceń, a na ich podstawie wyznaczane i analizowane są inne, pośrednie parametry (m.in.: naprężenia, krzywizny, pęknięcia, temperatura, proces wiązania betonu, itp.). W przypadku systemów pomiarowych stosowanych w budynkach, najwięcej aplikacji znalazły czujniki interferometryczne typu SOFO® (przede wszystkim pomiary statyczne), ale również przetworniki bazujące na światłowodowych siatkach Bragga FBG, stosowane do pomiarów dynamicznych (analiza drgań, przyspieszeń, wychyleń). Szczegółowe informacje oraz opisy przykładowych realizacji systemów SHM w obszarze budynków, w tym również zabytkowych, znaleźć można m.in. w pracach: [10, 44, 45, 46, 47, 48].

2.6.2 Monitorowanie mostów

Szerokie zastosowanie systemy SHM znalazły w monitorowaniu stanu technicznego mostów. Podobnie jak to ma miejsce w przypadku budynków, również w dziedzinie konstrukcji mostowych można zauważyć trend zmierzający do zwiększania wymagań stawianych tego typu konstrukcjom (zwiększanie nośności, większe rozpiętości, stosowanie nowoczesnych materiałów, itp.). Wiąże się to oczywiście ze wzrostem zapotrzebowania na kompleksowe systemy pomiarowe, które poprzez ciągłą rejestrację zmian (pod wpływem zmieniających się obciążeń zewnętrznych) wybranych wielkości fizycznych zagwarantują pełne bezpieczeństwo eksploatacji takiego obiektu przez lata.

Podstawowym zadaniem stawianym systemom SHM stosowanych w obrębie konstrukcji mostowych jest wspomaganie ekspertów w określaniu rzeczywistego stanu statyczno- i dynamiczno-wytrzymałościowego monitorowanych elementów konstrukcji [49]. Najczęściej stosowane są układy, które w trybie „on-line” rejestrują zachowanie konstrukcji w trakcie codziennej eksploatacji mostu, również w trakcie niekorzystnych warunków atmosferycznych (np.: gwałtowne porywy wiatru, ulewne deszcze, intensywne opady śniegu, oblodzenia, itp.), ale także różnych sytuacjach awaryjnych, np. uszkodzenia konstrukcji mostu w wyniku kolizji drogowej. Celem inżynierskim jest ocena stanu technicznego mostu poprzez porównanie aktualnych ugięć z ugięciami przewidywanymi na podstawie modelu obliczeniowego, a także analiza zmian sztywności mostu będących sygnałem uszkodzeń lub degradacji [49].



Rys. 2.15. Idea systemu SHM dla północnego mostu Młyńskiego we Wrocławiu [opracowanie własne].

Zatem w zależności od rodzaju konstrukcji mostu (mosty belkowe, wiszące, łukowe, podwieszane, wspornikowe, itp.) oraz wymagań inwestora/operatora, systemy monitorowania stanu technicznego najczęściej realizują pomiary następujących wielkości [50, 10]:

- odkształcenia (naprężenia) elementów konstrukcyjnych,
- ugięcia przęseł (krzywizny),
- rozwarście szczelin dylatacyjnych,
- zmiana kąta przechyłu elementów konstrukcyjnych,

- drgań (amplitud, postaci drgań własnych i towarzyszących im częstości, tzw. analiza modalna),
- sił wciąganych sprężających (straty w tzw. pre-stresie), wantach i linach (prętach) podwieszających oraz kotwach,
- ciśnienie parcia gruntu na elementy konstrukcji lub podpory,
- inne (w tym pomiary: temperatur powietrza i nawierzchni, oblodzenia, kierunku i siły wiatru, opadów, które realizowane przez zdalne stacje meteo zainstalowane na obiekcie).

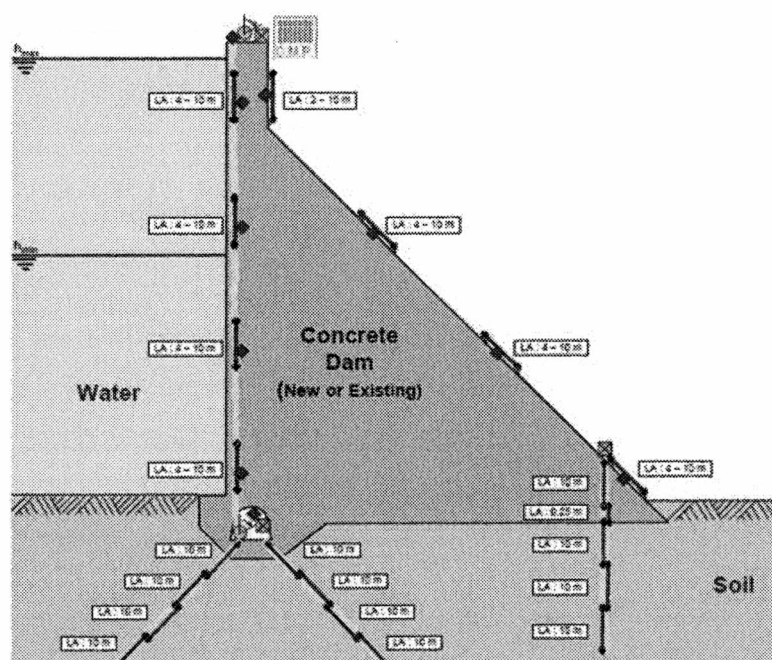
Do realizacji powyższych pomiarów stosowane są czujniki bazujące zarówno na przetwornikach światłowodowych (interferometryczne, FBG, F-P, ale również czujniki rozłożone), jak również na przetwornikach tensometrycznych, elektro-oporowych lub strunowych. W projektowaniu systemów monitorowania stanu technicznego mostów, podobnie jak w przypadku budynków, wykorzystuje się metodę FE-SHM oraz opisane w punkcie 2.6.1 topologie rozmieszczania czujników w poszczególnych komórkach pomiarowych. Przykładowe rozmieszczenie czujników systemu SHM dla mostu przedstawiono na Rys. 2.15.

W literaturze przedmiotu znaleźć można szczegółowe rozwiązania i opisy aplikacji systemów pomiarowych w obszarze konstrukcji mostowych. Przykładowe realizacje rzeczywistych układów pomiarowych opisano m.in. w: [24, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55].

2.6.3 Monitorowanie zapór i innych obiektów hydrotechnicznych

Konstrukcje zapór i innych obiektów hydrotechnicznych (w tym: zapór wodnych ziemnych i betonowych, wałów przeciwpowodziowych, jazów, śluz, nabrzeży portowych, umocnień brzegu morskiego, zbiorników retencyjnych i poflotacyjnych, itp.) w trakcie długoletniej eksploatacji, narażone są na duże obciążenia mechaniczne. W zależności od rodzaju budowli mogą występować obciążenia ściskające lub/i rozciągające. Dlatego jednym z najważniejszych parametrów, który wymaga monitorowania jest odkształcenie. Pozwala to na wskazanie obszarów, w których występują niebezpieczne dla konstrukcji poziomy naprężeń, pęknięcia, oraz miejsca osiadania konstrukcji. Zmiany rozkładu naprężeń, występujące w całej zaporze, są związane przede wszystkim ze zmianami poziomu wody w zbiorniku, a także deformacjami konstrukcji zapory na skutek ruchów w warstwie gruntowej, gradientem temperatur w fazie wiązania betonu w trakcie budowy, czy też ze zmianami pór roku/dnia. Inną grupę problemów stanowią zagadnienia związane z przesączaniem się wody, występującym bądź to w strefie posadowienia (fundamentów), bądź też przez pęknięcia potencjalnie występujące w całym obszarze obiektu. Stąd też najczęściej monitorowanymi parametrami są:

- wielkości geometryczne: odkształcenie, przemieszczenie, krzywizna, pochylenie (inklinacja),
- pęknięcia konstrukcji (lokalizacja, wielkość oraz monitorowanie propagacji),
- temperatura,
- ciśnienie porowe,
- przecieki (lokalizacja i kontrola intensywności).



Rys. 2.16. Schematyczne rozmieszczenie czujników w obrębie zapory ciężkiej w przekroju (konceptcja firmy SMARTEC, na podst. [51]).

Wyznaczone wartości przemieszczeń, odkształceń czy krzywizny powinny być na bieżąco porównywane z wartościami progowymi, określonymi na podstawie modelu obiektu i/lub wartości projektowych (definiują bezpieczny zakres eksploatacyjny). Przykładowe rozmieszczenie czujników, umożliwiające monitorowanie ww. parametrów w obszarze zapory typu ciężkiego przedstawiono na Rys. 2.16.

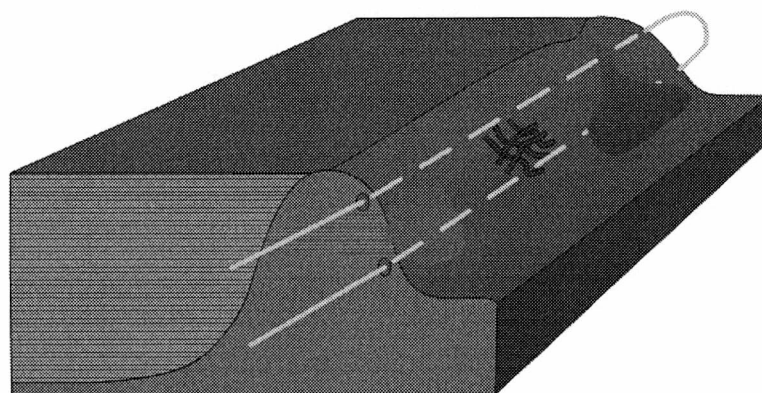
W literaturze przedmiotu spotkać można następujące rozwiązania SHM stosowane do kompleksowego monitorowania stanu technicznego obiektów hydrotechnicznych:

- wielopunktowe ekstensometry światłowodowe, kontrolujące rozkład przemieszczeń oraz odkształceń w warstwie gruntowej,
- czujniki o długich ramionach pomiarowych (od 20 cm do 20 m), umieszczone na powierzchni zapory, rejestrujące rozkład odkształceń średnich oraz jej krzywiznę (w dwóch płaszczyznach),
- inklinometry umieszczone na szczycie oraz w galeriach, kontrolujące bezwzględną rotację konstrukcji,

- termopary, zapewniające pomiar rozkładu temperatury oraz kontrolę odkształceń związanych ze zmianami temperatury,
- piezometry, umieszczone w otworach pod zaporą, kontrolujące ciśnienie porowe,
- układy do pomiaru propagacji pęknięcia, z wykorzystaniem tzw. topologii trójkątnej oraz standardowych czujników o długich ramionach pomiarowych,
- czujniki przyspieszeń, usytuowane w galeriach oraz na koronie zapory (dla zapór znajdujących się na terenach sejsmicznych).

Ponadto, w celu kompleksowego monitorowania całej zapory coraz częściej stosowane są układy oparte na światłowodowych czujnikach rozłożonych, które umożliwiają pomiary odkształceń oraz temperatury. Czujniki te instalowane są np. wzdłuż linii, na których występują maksymalne naprężenia. Pozwala to na wykrywanie powstających pęknięć, a ponadto umożliwia kontrolę średnich wartości odkształceń jak i ocenę krzywizny zapory. Czujniki te mogą zastępować wymienione wcześniej rozwiązania „lokalne”. Rozłożone czujniki temperatury mogą zapewnić detekcję oraz lokalizację miejsca przesączeń i przecieków na powierzchni zapory (od strony napowietrznej) oraz przeciekanie wody przy podstawie zapory. Systemy oceny stanu technicznego przeznaczone do monitorowania zapór określane są mianem Automatycznych Systemów Technicznej Kontroli Zapór (w skrócie: ASTKZ).

Wspomniane powyżej czujniki znajdują zastosowanie również w monitorowaniu stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych. Umożliwiają one wykrywanie i lokalizację miejsc przeciekania oraz przelewania się wody przez ścianę i koronę wałów ochronnych (tzw. termomonitoring, [52]). Poza tym możliwa jest detekcja i lokalizacja lokalnych ruchów w warstwie gruntowej (wzdłuż osi czujnika), związana np. z obsunięciem się ziemi. Idea systemu do monitorowania wałów przedstawiona została na Rys. 2.17. Reasumując, systemy SHM pozwalają na szybkie podejmowanie decyzji i optymalne zarządzanie konstrukcją hydrotechniczną [53].



Rys. 2.17. Idea monitorowania wałów z wykorzystaniem czujników rozłożonych (konceptcja firmy SMARTEC, na podst. [51]).

W literaturze przedmiotu z obszaru monitorowania stanu technicznego obiektów/konstrukcji hydrotechnicznych znaleźć można coraz więcej prac opisujących systemy SHM bazujące m.in. na technice światłowodowej. Jest to wynikiem zwiększania się świadomości zarządców i służb dbających o zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji obiektów hydrotechnicznych, a tym samym zapotrzebowania na kompleksowe systemy oceny ich stanu. Szczegóły dotyczące wykorzystania czujników światłowodowych do monitorowania wspomnianych powyżej parametrów można znaleźć między innymi w następujących pracach: [54, 55, 13, 56, 44, 57, 58, 59, 60, 40].

2.6.4 Monitorowanie rurociągów

Bezpieczeństwo użytkowania rurociągów jest istotnym problemem dla ich właścicieli oraz eksploatorów. Dotyczy to zarówno gazociągów, rurociągów do transportu ropy naftowej, jak również rurociągów przemysłowych w zakładach chemicznych (np. do przesyłu chloru, amoniaku, czy też wodoru) oraz elektrowniach (np. do transportu pary wodnej pod dużym ciśnieniem). Niejednokrotnie nawet niewielka awaria w postaci rozszczelnienia układu powoduje wymierne skutki dla środowiska naturalnego (ewentualne skażenie), jak i ekonomiczne dla właściciela rurociągu (czasowe wyłączenie z eksploatacji, utrata przesyłanych surowców, odszkodowania za zanieczyszczenie środowiska, itp.). W związku z powyższym koniecznym staje się ulepszenie procedur związanych z zarządzaniem rurociągami oraz bezpieczeństwem ich użytkowania, co w konsekwencji obniży straty ekonomiczne (zmniejszy koszty utrzymania), a zarazem środowiskowe związane z ich awariami.

Ocena sprawności technicznej rurociągów jest zadaniem szczególnie trudnym. Podobnie jak miało to miejsce przy omawianych wcześniej innych obiektach technicznych równocześnie występuje wiele czynników, tj. złożoność schematów statycznych, nieprzewidywalność obciążeń, zagrożenia ze strony środowiska naturalnego, postępująca degradacja materiałów, itp., które powodują, że opinie formułowane przez inżynierów kontrolujących ich stan techniczny bazują na niepewnych założeniach. Dodatkowym, a zarazem bardzo istotnym utrudnieniem są znaczące długości rurociągów [61]. Powoduje to, iż zastosowanie standardowych metod pomiarowych (np. tensometrii oporowej, termopar, emisji akustycznej, itp.) jest bardzo ograniczone. Standardowe przetworniki pomiarowe stosowane są przede wszystkim do pomiarów punktowych, a utworzenie sieci pokrywającej cały obiekt jest nieefektywne ze względów finansowych. Optymalnym rozwiązaniem do monitorowania dużych obiektów technicznych jest wykorzystanie układów pomiarowych bazujących na technice światłowodowej, ze szczególnym uwzględnieniem systemów rozłożonych.

Podstawowe zadania stawiane dla systemów pomiarowych SHM instalowanych w obrębie rurociągów to:

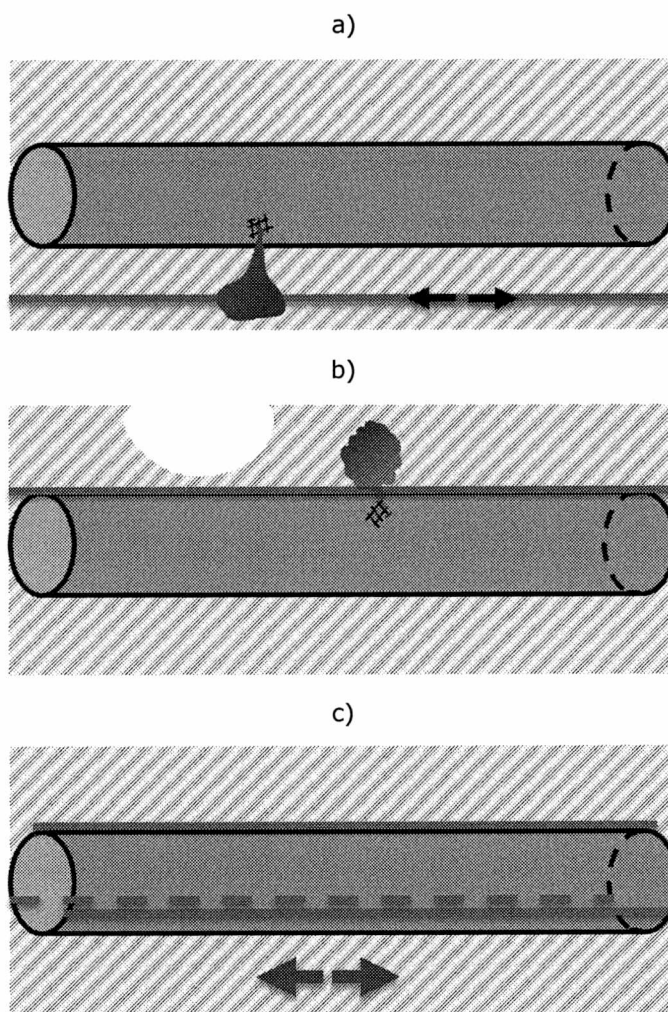
- monitorowanie rozkładu temperatury wzdłuż rurociągu w celach eksploatacyjnych oraz operacyjnych,
- wykrywanie i lokalizacja przecieków poprzez analizę lokalnych anomalii temperaturowych,
- monitorowanie odkształceń rurociągu w celu analizy jego deformacji (deformacje mogą być związane np. z ruchami geologicznymi podłoża, w tym trzęsieniami i obsunieniami ziemi, uszkodzeniem elementów nośnych, uderzeniami i kolizjami, itp.),
- kontrola przepływności rurociągu (detekcja zatorów i prześwitu rurociągu) poprzez pomiary odkształceń oraz zmiany w izolacji termicznej,
- monitorowanie procesów degradacji materiału konstrukcyjnego oraz określanie czasu bezpiecznej eksploatacji (np. wykrywanie korozji poprzez lokalne zmiany odkształceń),
- detekcja i lokalizacja umyślnych uszkodzeń,
- inne określone przez eksploatatora i właściciela rurociągu [61].

W przypadku rurociągów, których awarie (przede wszystkim rozszczelnienia) mogą mieć katastrofalny skutek dla środowiska naturalnego oraz życia i zdrowia ludzi, np. rurociągów przeznaczonych do dalekosiężnego transportu ropy naftowej i produktów naftowych, istnieją odpowiednie rozporządzenia, np.: [62, 63], które wymuszają na właścicielach takich obiektów zapewnienie odpowiedniej infrastruktury pomiarowej. Jej zadaniem jest realizacja ciągłej kontroli stanu technicznego obiektu, a szybkie wykrycie awarii lub przecieku ma spowodować natychmiastowe przerwanie tłoczenia oraz zamknięcie wszystkich zaworów celem ograniczenia wycieku produktu.

W literaturze przedmiotu z zakresu monitorowania stanu technicznego rurociągów znaleźć można wiele prac opisujących systemy SHM w zastosowaniu między innymi do monitorowania przecieków (np. [64, 65, 66]), stanu odkształceń (np. [67, 68]), czy też procesów degradacji i korozji materiałowej (np. [69, 70, 71]). Podstawową ideą, na której bazują systemy przeznaczone do wykrywania przecieków, jest założenie, że w przypadku pojawienia się rozszczelnienia i wycieku przesyłanej substancji, zmianie ulega lokalny rozkład temperatury wokół rurociągu [13]. W zależności od typu rurociągu i jego przeznaczenia, a także od warunków otoczenia, występować mogą m.in. takie zjawiska jak:

- lokalny wzrost temperatury w przypadku wycieku cieczy,
- lokalny spadek temperatury w przypadku rozszczelnienia gazociągu (efekt Joule’a-Thompsona, rozprężenie gazu),
- zmiana pojemności cieplnej warstwy gruntowej związana z wyciekami, powodująca inną charakterystykę lokalnych zmian temperatury.

Stworzenie dobrego systemu monitorującego stan techniczny rurociągu, nie zależy jedynie od parametrów stosowanego urządzenia pomiarowego i odpowiednio dobranej głowicy pomiarowej. Najistotniejszą rolę pełni tutaj lokalizacja czujników względem monitorowanego obiektu. W przypadku systemów przeznaczonych do monitorowania rurociągów do transportu produktów płynnych (ropa naftowa, woda grzewcza, itp.), ale umiejscowionych pod powierzchnią ziemi (w gruncie), czujniki instalowane są zazwyczaj poniżej rurociągu (np. w piasku), w odległości połowy jego średnicy. W takim położeniu istnieje największe prawdopodobieństwo gromadzenia się wyciekającego surowca, bez względu na lokalizację uszkodzenia na średnicy rurociągu (Rys. 2.18a). Dla ropociągów umiejscowionych pod powierzchnią wody światłowodowy czujnik temperatury umieszcza się powyżej rurociągu, gdyż uwolniony olej jest lżejszy od wody i ma tendencję do unoszenia się ku powierzchni. Wyciek surowca jest rejestrowany jako lokalny wzrost temperatury, w porównaniu do temperatury otoczenia poprzedzającej wyciek.



Rys. 2.18. Idea instalacji światłowodowych czujników rozłożonych do monitorowania rurociągów.

Usytuowanie czujnika względem gazociągu jest zgoła odmienne (Rys. 2.18b). Przede wszystkim wymagany jest kontakt termiczny czujnika z rurociągiem. Uwolnienie sprężonego gazu powoduje lokalne obniżenie temperatury rurociągu oraz otoczenia. W systemach SHM dla gazociągów rozłożony czujnik temperaturowy najczęściej jest instalowany na górnej powierzchni rurociągu. Ma to dodatkową zaletę, a mianowicie w przypadku rurociągów umiejscowionych w gruncie umożliwia lokalizację miejsc, w których przez osoby trzecie usunięta została warstwa ochronna. W takich obszarach czujnik oraz rurociąg są narażone na kontakt z powietrzem, co równocześnie powoduje lokalne warunki termiczne. Ponadto dla rurociągów umiejscowionych pod powierzchnią ziemi stosowane są rozłożone czujniki odkształceń, które umiejscowione bezpośrednio w gruncie pozwalają kontrolować ruchy geologiczne (deformacje warstwy gruntowej) oraz wykrywać intruzów.

Instalacja czujników rozłożonych przeznaczonych do pomiarów odkształceń bezpośrednio na powierzchni rurociągu (Rys. 2.18c) umożliwia kontrolowanie jego stanu wyężenia, co jest szczególnie istotne dla rurociągów znajdujących się w obszarach aktywnych sejsmicznie. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych progów bezpieczeństwa, operator ma możliwość wczesnego zatrzymania eksploatacji i naprawę uszkodzonych fragmentów.

W wybranych przypadkach do monitorowania stanu technicznego rurociągów stosowane są również czujniki punktowe. Przykładem takiej aplikacji są pomiary pola odkształceń ekstremalnie wyężonych kompozytowych rurociągów wykonanych z kompozytu epoksydowo-szklanego (ang.: Glass Fiber Reinforced Composite, GFRC), wykorzystywanych w instalacjach ochrony środowiska wchodzących w skład bloku energetycznego. Szczegółowe informacje przedstawione zostały w pracy [72].

3 Zastosowania czujników światłowodowych w pomiarach wybranych elementów i konstrukcji kompozytowych

Materiał kompozytowy powstaje przez połączenie dwóch nie rozpuszczających się w sobie faz. Jedną z nich jest faza ciągłą, zwana osnową. Otacza ona fazę rozproszoną (zwaną zbrojeniem), pełniącą rolę wzmocnienia. W wyniku połączenia tych materiałów powstają materiały o właściwościach (głównie mechanicznych) trudnych do osiągnięcia dla materiałów wyjściowych [73]. Mechaniczne właściwości kompozytów zależą od trzech podstawowych czynników [74]:

- sztywności i wytrzymałości włókien,
- sztywności osnowy kompozytu,
- wytrzymałości adhezyjnej między włóknami a osnową.

Wyjściowe właściwości mechaniczne samego kompozytu wynikają z wzajemnych proporcji wyżej wymienionych czynników.

Osnowa w kompozycie przede wszystkim zabezpiecza warstwowość kompozytu, zapewnia określony kształt elementu konstrukcji oraz odpowiednie rozmieszczenie włókien. Ponadto umożliwia równomierny rozkład obciążenia na włókna, a w przypadku jego pęknięcia, przeniesienie obciążenia na sąsiednie. W przypadku zniszczenia części włókien, przekazuje obciążenia na pozostałe pracujące włókna. Osnowa decyduje o właściwościach chemicznych i cieplnych kompozytu. Może ona być wykonana z następujących materiałów [74]:

- polimery: termoplastyczne, chemoutwardzalne, termoutwardzalne,
- metale: stopy tytanu, magnezu, miedzi, niklu, aluminium,
- ceramika: węgiel krzemu (SiC), tlenek glinu (Al_2O_3), azotek siarki (Si_3N_4),
- cement.

Materiał wzmacniający odpowiada przede wszystkim za właściwości mechaniczne kompozytu. Powinien on charakteryzować się przede wszystkim dużą wytrzymałością. Wymaga się także by był odporny chemicznie, tak aby nie reagował z materiałem osnowy. Najważniejsze materiały stosowane do wzmocnienia kompozytów to włókna szklane, węglowe, grafitowe, organiczne (aramidowe, celulozowe, polietylenowe), borowe, ceramiczne i metalowe [73]. Wzmocnienie w kompozytach może mieć różną postać, a mianowicie:

- włókna ciągłego (długiego),
- tkaniny wzmacniające w dwu kierunkach (w płaszczyźnie), a także tkanin dystansowych i wielowarstwowych,
- dzianiny wzmacniające,
- maty z włókien ciętych lub ciągłych w postaci pętli,
- włókna ciętego,

– proszków.

Rodzaj wzmocnienia wpływa głównie na wytrzymałość i sztywność kompozytu, natomiast postać wzmocnienia – na stopień właściwości anizotropowych (silne, słabe, quasi-izotropowe). Kompozyty mające więcej niż jeden rodzaj wzmocnienia określane są jako hybrydowe [74].

Największa liczba badań i rzeczywistych zastosowań technicznych dotyczy kompozytów, w których podstawę stanowią polimery, ceramika lub metale (np. stopy aluminium, tytanu, niklu i inne), natomiast wzmocnienie stanowią włókna szklane bądź węglowe. Znalazły one szerokie zastosowanie nie tylko w przemyśle, ale także w konstrukcjach przedmiotów powszechnego użytku. Materiały kompozytowe stosowane są dziś m.in. do produkcji kadłubów oraz innych elementów konstrukcyjnych samolotów, szybowców, promów i rakiet kosmicznych, elementów karoserii samochodów, zbiorników paliwa, kadłubów oraz masztów jachtów, łopat wirników w elektrowniach wiatrowych, elementów sprzętu gospodarstwa domowego, oraz wielu innych. Ponadto kompozyty stosowane są również jako elementy wzmacniające istniejących oraz remontowanych konstrukcji budowlanych (np. zwiększenie nośności mostów).

Udział materiałów kompozytowych w zastosowaniach high-tech z roku na rok staje się coraz większy. Wywołuje to z kolei wzrost produkcji włókien wzmacniających. Szacuje się, że w roku 2018 nastąpi wzrost zapotrzebowania na włókno węglowe, w porównaniu do zapotrzebowania w roku 2010, o ok. 275% (z 41240 do 113500 ton) [75]. Największy wzrost popytu przewidywany jest z zastosowaniami dla przemysłu związanego z energią wiatrową (700%) oraz gromadzeniem sprężonych paliw gazowych (~410%), a także z szeroko pojętym przemysłem lotniczym (~220%).

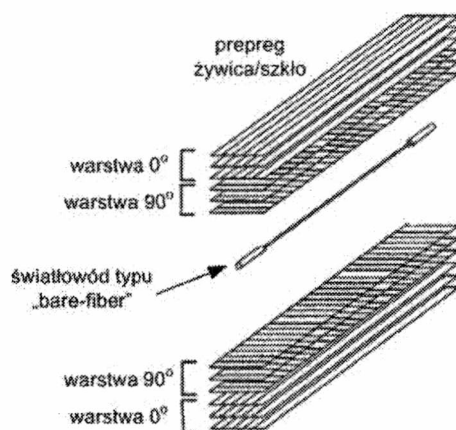
Zainteresowanie materiałami kompozytowymi spowodowane jest ich bardzo dobrymi parametrami mechanicznymi oraz wytrzymałościowymi, przy jednoczesnym małym ciężarze właściwym. Bardzo cenna jest także możliwość stworzenia kompozytu o ściśle określonych parametrach i właściwościach na potrzeby zadanej konstrukcji. Ponadto coraz częściej w strukturę materiałów kompozytowych wbudowane są różnego rodzaju czujniki, a przede wszystkim czujniki bazujące na głowicach światłowodowych. Umożliwia to pomiar wielkości mechanicznych i innych (odkształcenia, temperatura) bezpośrednio w materiale (konstrukcji). Jednakże poza standardowym zastosowaniem czujników OFS do pomiarów obciążeń w konstrukcji, dużo ciekawsze oraz praktyczniejsze z punktu widzenia użytkowników obiektów, jest ich wykorzystanie do wykrywania defektów powstających w materiale w trakcie eksploatacji. Określenie stopnia zużycia, stopnia zdefektowania, czy też wyznaczenie czasu bezpiecznej eksploatacji pozwala zwiększyć bezpieczeństwo stosowania elementów wykonanych z materiałów kompozytowych. Większość realizowanych w ostatnich latach badań z zakresu aplikacji czujników światłowodowych

w materiałach kompozytowych jest związana właśnie z ich wykorzystaniem do ciągłego monitorowania stanu technicznego elementów kompozytowych.

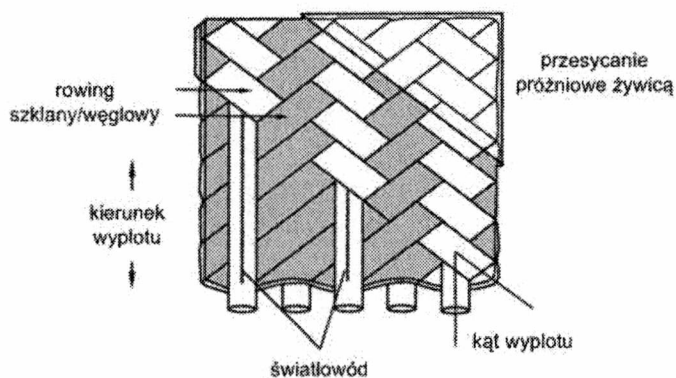
3.1 Wzmacniające laminaty i pultrudy kompozytowe

Najszerze zastosowanie czujniki światłowodowe znalazły w obszarze pomiarów odkształceń różnego rodzaju laminatów oraz pultrud kompozytowych, np.: [76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 13]. Związane jest to szeregiem zalet, którymi charakteryzują się czujniki światłowodowe. Wymienić tu należy:

- zbliżone własności materiałowe czujnika oraz materiału zbrojenia w kompozycie,
- możliwość umiejscowienia czujnika bezpośrednio w materiale, nawet o złożonym kształcie (małe wymiary i ciężar, elastyczność głowicy pomiarowej),
- odporność na zakłócenia E-M (czujnik jest dielektrykiem),
- szeroki zakres mierzonych wielkości fizycznych, przy jednocześnie możliwym pomiarze w wielu punktach,
- odporność na warunki środowiskowe.

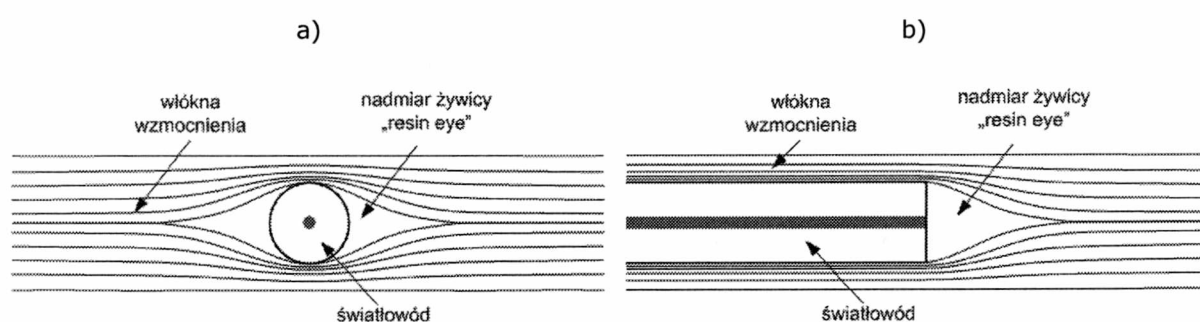


Rys. 3.1. Przykładowa lokalizacja czujnika światłowodowego OFS pomiędzy kolejnymi warstwami laminatu kompozytowego $[0_3/90_3/\text{OFS}/90_3/0_3]$ (na podst.: [76]).

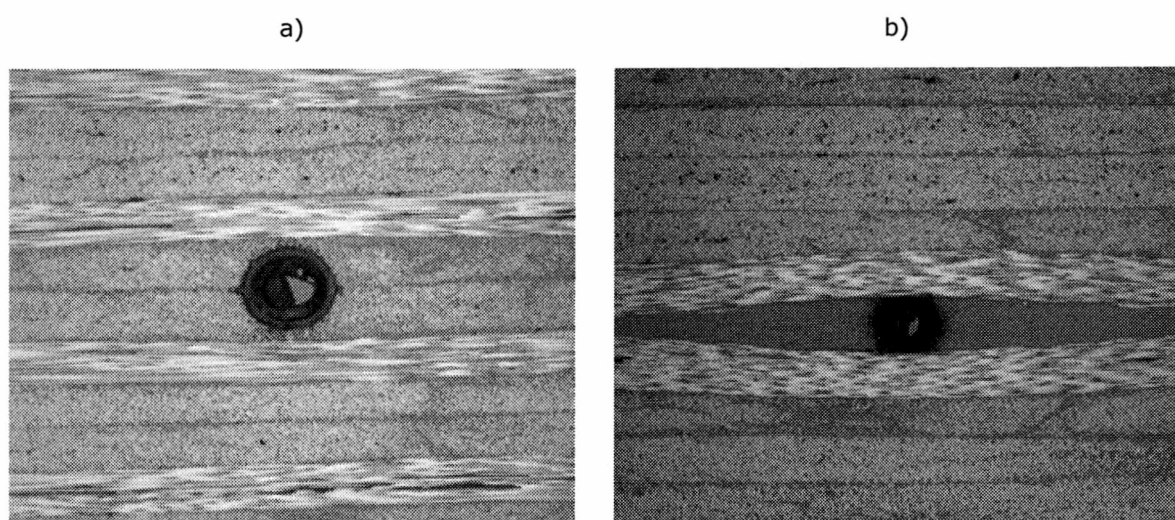


Rys. 3.2. Wypłatanie materiału kompozytowego ze zintegrowanym czujnikiem światłowodowym (na podst. [82]).

Czujniki światłowodowe, najczęściej w postaci światłowodowych siatek Bragga typu „bare-fiber” (np.: [83, 77, 79]), bądź też czujników interferometrycznych (np.: [79, 82, 84]), rzadziej czujników amplitudowych (np.: [85]), umieszczane są bezpośrednio pomiędzy kolejnymi warstwami laminatu (Rys. 3.1) lub też w przypadku elementów wyplatanych/ciągnionych, wplatane są bezpośrednio pomiędzy wiązki wzmocnienia (Rys. 3.2). W zależności od metody wytwarzania kompozytu oraz końcowego jego zastosowania, czujnik może być przesycany żywicą w trakcie wytwarzania samego materiału (tzw. metody „mokre”, np. pultruzja, nawijanie), bądź też później metodą próżniową.



Rys. 3.3. Schemat powstawania lokalnych defektów w laminatach kompozytowych z zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi (na podst. [9]).



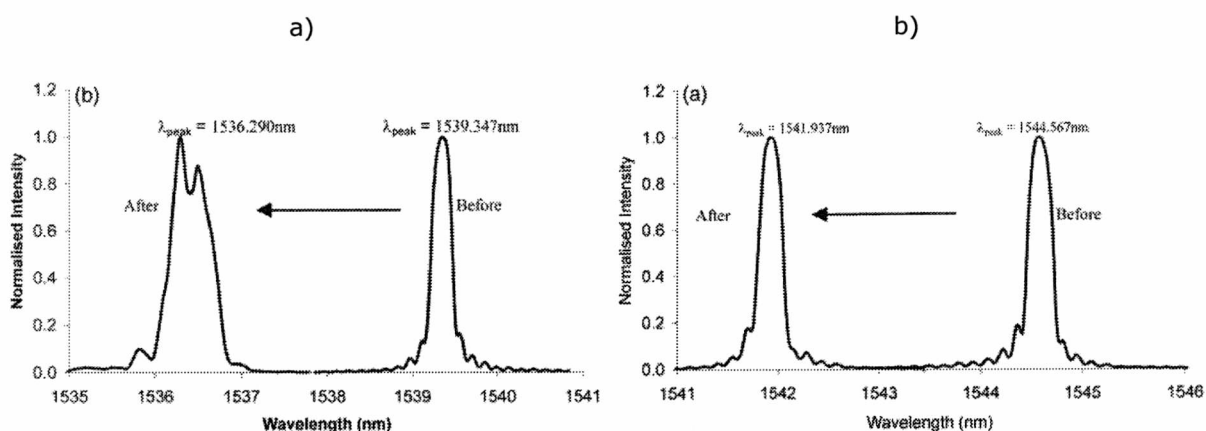
Rys. 3.4. Widok kompozytu węglowo-epoksydowego z wbudowanym światłowodem: równoległe (a) oraz prostopadłe (b) do włókien wzmocnienia (na podst. [86]).

Pomimo tego, iż średnica światłowodu jest stosunkowo niewielka (standardowo wynosi 125 μm), jednak w porównaniu do średnicy włókien stosowanych jako wzmocnienie kompozytu (dla włókien szklanych $\sim 16 \mu\text{m}$, a dla węglowych $\sim 8 \mu\text{m}$) oraz grubości pojedynczej warstwy laminatu, jest ona dość znacząca. W związku z czym umiejscowienie światłowodu wewnątrz struktury kompozytu może wprowadzać do materiału obszary nieciągłości wzmocnienia [78]. Miejsca te wypełnione są nadmiarowo żywicą i są określa-

ne w literaturze angielskojęzycznej jako „resin pocket” lub „resin eye” (Rys. 3.3 oraz Rys. 3.4). Powstałe lokalne zakłócenia rozkładu pola naprężeń w materiale mogą započzątkować proces delaminacji [9, 86].

Rozmiar i kształt lokalnego defektu w postaci wypełnienia żywicą zależą od orientacji włókna światłowodu względem włókien wzmocnienia. Najmniejszy wpływ na parametry mechaniczne laminatu ma ułożenie czujnika zgodnie z kierunkiem wzmocnienia, a największy prostopadłe do niego (Rys. 3.3a). Ponadto ważne jest, aby wewnątrz laminatu nie pozostawiać również wolnego końca światłowodu (Rys. 3.3b), wokół którego także dochodzi do lokalnych nieciągłości wzmocnienia [9].

Kolejnym aspektem wymagającym rozważenia jest wpływ procesu produkcyjnego kompozytowego laminatu na właściwości pomiarowe czujników FBG umiejscowionych w jego wnętrzu. W pracy [77] analizowano widmo odbiciowe pochodzące od światłowodowej siatki Bragga w referencyjnym otoczeniu (poza kompozytem, przed jego instalacją), porównując je do odpowiedzi czujnika osadzonego bezpośrednio pomiędzy warstwami laminatu. Dla niektórych próbek testowych zaobserwowano zniekształcenie oraz poszerzenie szerokości widma odbitego od czujnika. Związane było to z występowaniem lokalnie silnych niejednorodności w obciążeniu oddziaływującym na czujnik na całej jego długości (7 mm). Tak lokalnie występujące nierównomierności w rozkładzie pola odkształceń powodowały przede wszystkim zwiększenie bądź też zmniejszenie stałej siatki Bragga (Λ), co było zaobserwowane jako rozszczepienie się pojedynczego piksu fali Bragga na kilka dodatkowych. Takie zachowanie się czujnika występowało przede wszystkim dla laminatów składających się z kilku warstw kompozytu ułożonych pod różnymi kątami względem siebie (Rys. 3.5a).



Rys. 3.5. Przesunięcie widma odbiciowego pochodzącego od czujników FBG w trakcie produkcji laminatów kompozytowo-aluminiowych o kilku warstwach ułożonych pod różnymi kątami względem siebie (a) oraz laminatu jednokierunkowego (b) (na podst.: [77]).

W przypadku kompozytów jednokierunkowych zaobserwowano jedynie przesunięcie widma odbiciowego (fali Bragga) w stronę mniejszych wartości (Rys. 3.5b), co było związane z lokalnym ściskaniem lub rozciąganiem czujnika pod wpływem realizowanych procesów produkcyjnych (m.in. utwardzenia żywicy w podwyższonym ciśnieniu i temperaturze). W przypadku laminatów kompozytowych zaobserwowano lokalne rozciąganie czujnika na poziomie od 214 do 368 $\mu\epsilon$, natomiast w przypadku laminatów kompozytowo-aluminiowych (ang.: fibre/metal laminates, FML) zarejestrowano ściskanie rzędu $-2183 \div -2546 \mu\epsilon$. Tak duże ściskanie w kompozytach typu FML jest efektem dużych różnic pomiędzy współczynnikami rozszerzalności cieplnej poszczególnych materiałów. Niedopasowanie współczynników powoduje występowanie naprężeń ściskających w obszarze czujnika w momencie chłodzenia próbki w trakcie procesu produkcyjnego [77].

Jednym z podstawowych zastosowań laminatów oraz pultrud kompozytowych jest ich wykorzystanie do realizacji różnego typu wzmocnień istniejących, bądź też dopiero realizowanych konstrukcji technicznych. Powszechnie stosowanym sposobem podwyższenia wytrzymałości oraz zwiększenia nośności obiektów takich jak mosty, wiadukty, budynki, jest doklejanie dodatkowego zbrojenia wykonanego z materiałów charakteryzujących się dużą wytrzymałością na rozciąganie oraz sztywnością (np. laminatu lub pultrudy w postaci taśmy lub maty przyklejanych do powierzchni wzmacnianej konstrukcji). Dzięki stosunkowo niewielkiemu ciężarowi wzmocnienie nie obciąża dodatkowo konstrukcji, przez co nie zmniejsza jej nośności.

Pomimo wspomnianych zalet, kompozytowe wzmocnienia wykazują jednak tendencję do pękania w czasie oraz charakteryzują się dużą kruchością. Dlatego też realizowane są badania mające na celu wykrywanie i kontrolę wewnętrznych defektów materiałowych w ich wczesnym stadium rozwoju [80]. Przykładowo w pracy [84] została opisana metoda wytwarzania kompozytów typu GFRC (ang.: Glass Fiber Reinforced Composite) oraz CFRP (ang.: Carbon Fiber Reinforced Composite) metodą pultruzji z umiejscowionymi w środku czujnikami FBG oraz EFPI. Uzyskane wyniki pomiarowe z czujników światłowodowych dla prób quasi-statycznych oraz cyklicznych dla wytworzonych próbek były zgodne z wynikami uzyskanymi z pomiarów ekstensometrycznych. Ponadto wykazano, iż lepszymi parametrami połączenia pomiędzy czujnikiem a materiałem kompozytowym, charakteryzują się światłowody w pokryciu polimerowym. Czujniki w płaszczu akrylowym wykazywały tendencję do rozwarstwiania się w laminacie oraz nie mogły być stosowane w kompozytach, dla których wymagane były procesy produkcyjne w temperaturach powyżej 85°C. Dla czujników w pokryciu polimerowym dopuszczalne temperatury wynosiły nawet 385°C [84].

Możliwość monitorowania procesu utwardzania żywicy w procesie wytwarzania wysoko wyciężonych laminatów metodami światłowodowymi została opisana m.in. przez Lenga w pracy [79]. Zastosowanie czujników FBG oraz EFPI umożliwia wyznaczenie odkształceń

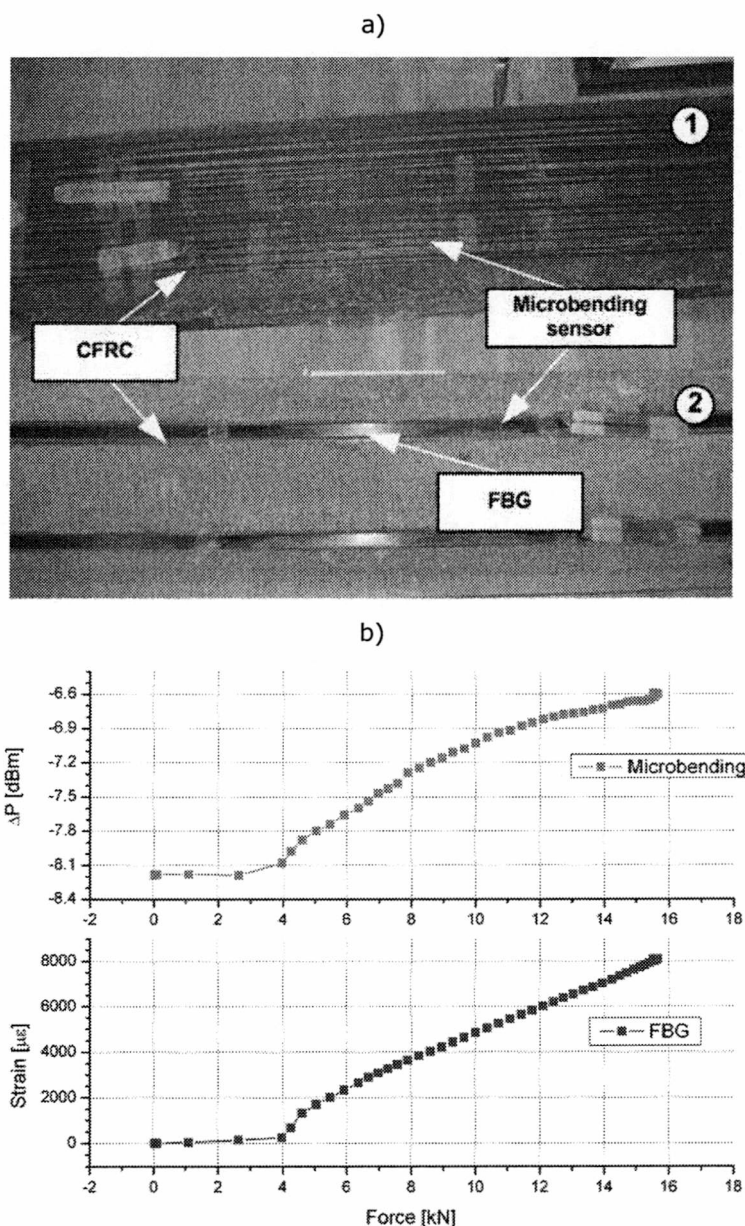
resztkowych przy utwardzaniu oraz wykrycie lokalnych defektów materiałowych w postaci delaminacji. Autorzy przygotowali próbki wykonane z 16-tu warstw prepregów węglowych, pomiędzy którymi zainstalowano, zgodnie z kierunkiem ułożenia wzmocnienia, wspomniane czujniki światłowodowe. Dodatkowo w jednej z próbek pomiędzy warstwami kompozytu umieszczono krążek o średnicy 30 mm wykonany z teflonu, który symulował lokalną delaminację. Próbki w celu utwardzenia wygrzewane były w temperaturze dochodzącej do 120 °C. Analiza sygnałów pochodzących z czujników zainstalowanych w próbce bez defektu oraz z defektem, pozwala już w trakcie procesu utwardzania określić występowanie lokalnego uszkodzenia materiału. Zauważono ponadto, iż odkształcenia resztkowe po procesie utwardzania próbek są większe w kierunku ściskania dla próbki z defektem. Różnica pomiędzy sygnałami uzyskanymi z czujników EFPI oraz FBG, dla testowych próbek w trakcie procesu utwardzania, wynosiła 5÷10% [79]. Następnie w celu wyznaczenia wytrzymałości na zginanie, próbki zostały poddane próbie 3-punktowego zginania. Uzyskane wyniki potwierdziły, iż wytrzymałość próbek z programowanym defektem jest mniejsza niż wytrzymałość próbek bez defektu, a wprowadzona sztucznie delaminacja obniża sztywność konstrukcji [79].

W pracy [87] opisana została aplikacja czujników FBG umiejscowionych w pultrudach epoksydowo szklanych (GFRP-OFBG) oraz epoksydowo węglowych (CFRP-OFBG), przeznaczonych do wzmocniania betonowych belek. Tak przygotowane elementy kompozytowe zostały zalane betonem, utwardzone, a następnie poddane testom trzypunktowego zginania. Czujniki FBG rejestrowały odkształcenia prętów kompozytowych w zakresie do 1200 $\mu\epsilon$ (z dokładnością 1÷2 $\mu\epsilon$), rejestrowały pęknięcia w warstwie betonowej, a także informowały o wyslizgiwaniu się wzmocnień z betonu. Zatem kompozytowe pręty wraz z czujnikami FBG wykonane metodą pultruzji mogą być stosowane zarówno jako elementy zwiększające nośność konstrukcji (wzmocnienie konstrukcji), a także jako głowice pomiarowe zintegrowane bezpośrednio w monitorowanym elemencie [80].

Przykładowe wyniki badań kompozytowych wzmocnień dla konstrukcji technicznych, zrealizowanych w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej PWr, przedstawiono poniżej. Na testowych belkach betonowych naklejone zostały wzmocnienia kompozytowe w postaci taśm CFRC oraz GFRC wykonanych metodą pultruzji. Wraz ze wzmocnieniami zainstalowane zostały również dwa rodzaje czujników światłowodowych: FBG oraz głowice mikrougięciowe. Poniżej (Rys. 3.6a) pokazano dwie testowe belki betonowe ze wzmocnieniami kompozytowymi (wykonanymi metodą laboratoryjną przez IMMT oraz przez firmę Polskie Mosty), z którymi zintegrowano czujniki światłowodowe. W czasie próby trzypunktowego zginania testowej belki, przy użyciu maszyny wytrzymałościowej MTS810, rejestrowano w funkcji czasu: siłę, odkształcenie (mierzone przez FBG), a także zmianę mocy optycznej (rejestrowaną przez głowicę mikrougięciową).

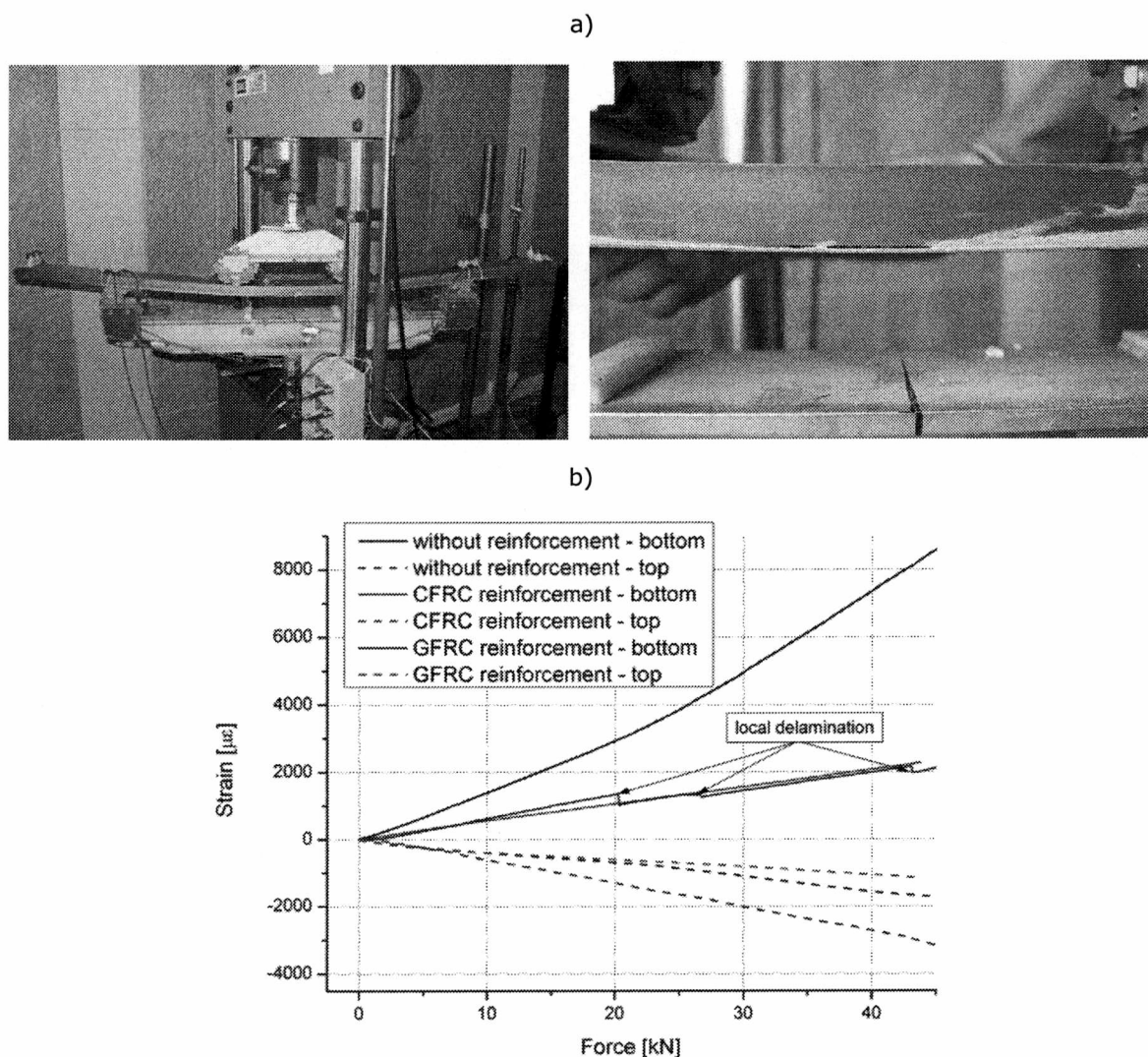
Na Rys. 3.6b przedstawiono uzyskane przykładowe wyniki z pomiarów dla czujnika mikrougięciowego oraz FBG w funkcji siły przyłożonej do testowej belki ze wzmocnieniami CFRC przez firmę Polskie Mosty. Analogiczne pomiary przeprowadzono dla testowych belek betonowych bez wzmocnienia i z wzmocnieniem z kompozytu szklanego oraz węglowego, wykonanych metodą laboratoryjną.

Zrealizowane pomiary pozwoliły na określenie wpływu rodzaju wzmocnienia na wytrzymałość belek betonowych. Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność czujników światłowodowych do badania obiektów technicznych wzmacnianych elementami z materiałów kompozytowych [88].



Rys. 3.6. Testowe belki ze wzmocnieniami kompozytowymi (a), wykonanymi metodą laboratoryjną (1) oraz przez firmę Polskie Mosty (2), a także charakterystyki (b) uzyskane przy zastosowaniu czujnika mikrougięciowego oraz FBG dla belki z komercyjnym wzmocnieniem kompozytowym [88].

Kolejne badania zostały zrealizowane dla dwóch rodzajów wzmocnień (pultrudy węglowe oraz szklane) ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi FBG, przeznaczonych do zwiększania nośności konstrukcji stalowych. Wzmocnienie wraz z czujnikiem zostało naklejone na belkę od strony spodniej (rozciąganej, oznaczonej na rysunku poniżej ang.: CFRC reinforcement – bottom). Dodatkowo na stronie wierzchniej (ściskanej, oznaczonej na rysunku poniżej ang.: CFRC reinforcement – top) zainstalowano dodatkowy czujnik referencyjny (również w postaci FBG). Wzmocnione belki zostały poddane statycznej próbie czteropunktowego zginania (Rys. 3.7a), w trakcie której rejestrowano siłę oraz odkształcenie w dwóch obszarach. Uzyskane wyniki pomiarowe przedstawione zostały poniżej na Rys. 3.7b. Dodatkowy pomiar, pozwalający określić wpływ zastosowanego kompozytowego wzmocnienia na konstrukcję, zrealizowano na stalowej belce bez dodatkowych wzmocnień (oznaczonych na rysunku poniżej ang.: without reinforcement).



Rys. 3.7. Próba 4-punktowego zginania belki stalowej wzmocnionej jednokierunkowym kompozytem węglowo-epoksydowym ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi FBG (a) oraz porównanie uzyskanych wyników pomiarowych dla różnych wzmocnień (b) [89].

Kolejne badania zostały zrealizowane dla dwóch rodzajów wzmocnień (pultrudy węglowe oraz szklane) ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi FBG, przeznaczonych do zwiększania nośności konstrukcji stalowych. Wzmocnienie wraz z czujnikiem zostało naklejone na belkę od strony spodniej (rozciąganej, oznaczonej na rysunku powyżej ang.: CFRC reinforcement – bottom). Dodatkowo na stronie wierzchniej (ściskanej, oznaczonej na rysunku powyżej ang.: CFRC reinforcement – top) zainstalowano dodatkowy czujnik referencyjny (również w postaci FBG). Wzmocnione belki zostały poddane statycznej próbie czteropunktowego zginania (Rys. 3.7a), w trakcie której rejestrowano siłę oraz odkształcenie w dwóch obszarach. Uzyskane wyniki pomiarowe przedstawione zostały powyżej na Rys. 3.7b. Dodatkowy pomiar, pozwalający określić wpływ zastosowanego kompozytowego wzmocnienia na konstrukcję, zrealizowano na stalowej belce bez dodatkowych wzmocnień (oznaczonych na rysunku powyżej ang.: without reinforcement).

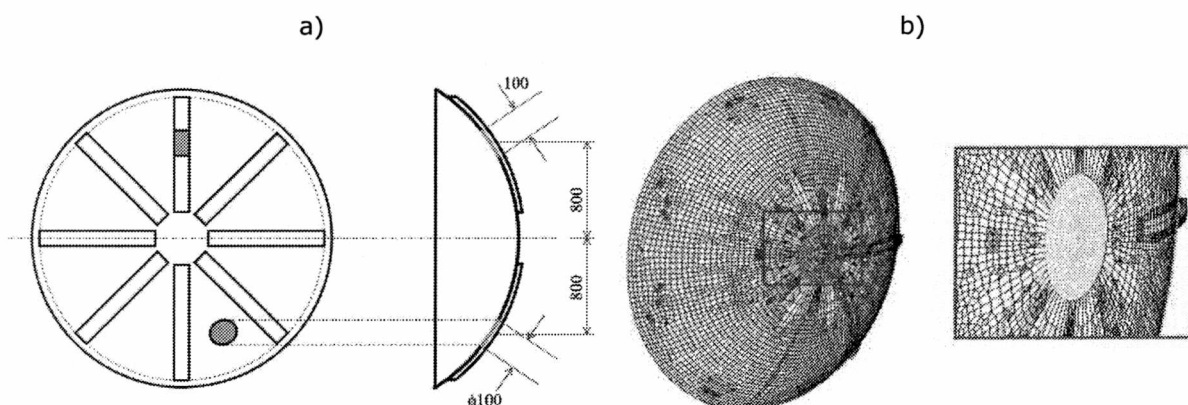
Można zauważyć, iż zastosowane wzmocnienia usztywniły belkę, a tym samym zwiększyły jej nośność, co objawia się jej mniejszymi odkształceniami w porównaniu do belki bez wzmocnień przy stałej wartości obciążenia. Zastosowanie wzmocnienia pozwoliło na zwiększenie zakresu sprężystego pracy całego elementu, który dla testowej belki kończył się dla ok. 20 kN. Na wykresie zmiany odkształceń belki ze wzmocnieniem wykonanym z kompozytu szklano-epoksydowo (GFRC) w funkcji przyłożonej siły, widoczne są lokalne skoki rejestrowanych wielkości odkształceń (przy ~20,2 kN, 26,4 kN oraz 43 kN). Świadczą one o lokalnym odklejaniu się wzmocnienia od konstrukcji. Na próbce były one widoczne jako lokalne zabielenia kompozytu. Dodatkowo na Rys. 3.7a przedstawiono zdjęcie próbki ze wzmocnieniem wykonanym z włókna węglowego w momencie jego całkowitego oddzielenia od podłoża (zniszczenie próbki) [89].

3.2 Elementy konstrukcji lotniczych

Coraz szersze zastosowanie kompozytowych elementów w konstrukcjach lotniczych jest związane z ich doskonałymi parametrami mechanicznymi, a w szczególności wysoką wytrzymałością i sztywnością. Nowoczesne samoloty (np. Boeing B787) wykorzystują w swej budowie wiele podzespołów wykonanych z materiałów kompozytowych, a w szczególności z kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym (CFRC). Mogą one stanowić nawet 80% wszystkich elementów (objętościowo), co stanowi 50% wagi gotowego samolotu [90]. Jednakże rozwój uszkodzeń w materiałach kompozytowych, w porównaniu do defektów powstających w materiałach metalicznych, jest znacznie bardziej skomplikowany i obecnie nie do końca rozpoznany [91]. Dlatego też w ostatnich latach realizowanych było wiele prac z zakresu monitorowania stanu technicznego (SHM) również elementów konstrukcji lotniczych z wykorzystaniem światłowodowych technik po-

miarowych, np. [92, 93, 9, 94, 95, 96, 97, 98]. We wspomnianych pracach opisane są doświadczenia autorów związane nie tylko z opracowywaniem systemów do monitorowania konstrukcji lotniczych w trakcie ich codziennej eksploatacji, ale również w trakcie procesów produkcyjnych poszczególnych komponentów kompozytowych (m.in. formowanie ciśnieniowe, próżniowe, impregnacja i utwardzanie żywicy, obróbka mechaniczna, montaż, itp.).

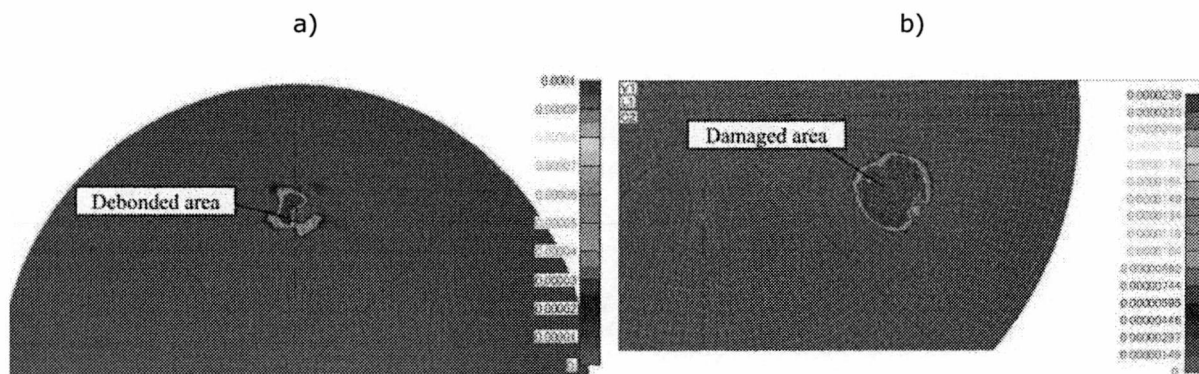
W pracy [92] opisano metodę opracowania systemu do ciągłego monitorowania kompozytowych elementów składowych kadłuba samolotu (przegroda ze wzmocnieniami) poprzez układ do kontroli stanu (rozkładu) odkształceń na jego powierzchni w całym okresie produkcyjnym oraz eksploatacji. Zastosowany został system bazujący na światłowodowych siatkach Bragga zintegrowanych ze strukturą kompozytu zbrojonego włóknem węglowym. Układ ten, poprzez pomiar lokalnych odkształceń, jest w stanie wykrywać oraz lokalizować defekty i inne uszkodzenia pojawiające się w materiale konstrukcji. Przedstawiono ponadto możliwość pomiaru stanu odkształceń kompozytowych próbek w trakcie czasu trwania całego procesu formowania ciśnieniowego oraz opisano jego wpływ na obiekt testowy. W celu określenia optymalnej lokalizacji czujników punktowych FBG na wzmocnionej przegrodzie kompozytowej, przygotowany został odpowiedni model numeryczny MES (Rys. 3.8), który obciążony został na zewnętrznej powierzchni ciśnieniem odpowiadającym maksymalnym wartościom projektowym.



Rys. 3.8. Model geometryczny z zaznaczonymi defektami (a) oraz numeryczny MES (b) kompozytowej przegrody ciśnieniowej, stosowanej w obliczeniach rozkładu pola odkształceń, dla obciążenia występującego w trakcie lotu (na podst.: [92]).

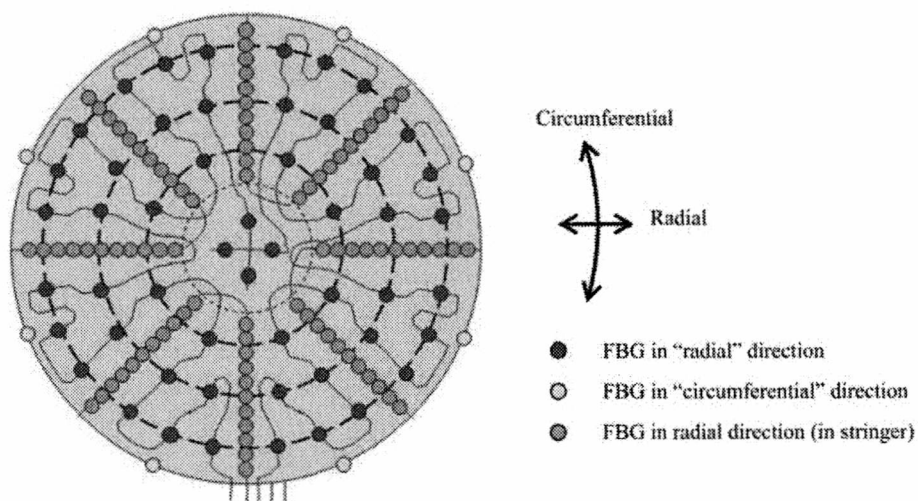
Ponadto na wirtualnym modelu zaimplementowano dwa rodzaje defektów: odspojenie wzmocnienia oraz lokalne uderzenie w płaszczyznę przegrody powodujące delaminację kompozytu (Rys. 3.9). Pozwoliło to na wyznaczenie optymalnej odległości pomiędzy czujnikami FBG, która zapewni wykrycie wymienionych defektów w dowolnym obszarze badanego obiektu. Oszacowano, iż dla czujnika o czułości równej $10 \mu\epsilon$, odległość pomiędzy kolejnymi czujnikami zainstalowanymi na wzmocnieniach nie powinna być więk-

sza niż 100 mm. Natomiast dla czujników kontrolujących powierzchnię przegrody jedna siatka FBG jest w stanie wykryć uszkodzenie na obszarze o średnicy 300 mm.



Rys. 3.9. Wynik obliczeń numerycznych rozkładu pola odkształceń dla przegrody ciśnieniowej z odspojonym wzmocnieniem (a) oraz przegrody po lokalnym uderzeniu (b) (na podst.: [92]).

Na rysunku poniżej (Rys. 3.10) przedstawiona została koncepcja systemu do monitorowania kompozytowej przegrody ciśnieniowej do zastosowań w lotnictwie. System ten bazuje na 156 czujnikach FBG zapisanych w 7 głowicach pomiarowych [92].



Rys. 3.10. Rozmieszczenie czujników FBG do detekcji uszkodzeń na kompozytowej przegrodzie ciśnieniowej (na podst.: [92]).

Największym problemem z którym spotykają się konstruktorzy systemów przeznaczonych do ciągłego monitorowania stanu technicznego konstrukcji jest lokalizacja przetworników pomiarowych oraz dobór odpowiedniej liczby punktów pomiarowych. Ograniczenie ilości czujników związane jest zarówno ze zmniejszeniem kosztów systemu pomiarowego (m.in. koszt czujników, oprzyrządowania, jednostek pomiarowych, instalacji systemu), a także z problemami przetwarzania dużych ilości informacji pomiarowych w trybie ciągłym („on-line”). Nie zawsze duża liczba czujników gwarantuje niezawodność

systemu. Równie ważne jest zapewnienie odpowiedniego oprogramowania z zaimplementowanymi algorytmami przetwarzania danych, które będzie w stanie na bieżąco informować użytkownika o ewentualnych zagrożeniach.

Jednakże równocześnie z pracami mającymi na celu optymalizację rozmieszczenia i liczby czujników, np. poprzez modelowanie numeryczne oraz podejście hybrydowe (model + eksperyment), prowadzone są prace eksperymentalne mające na celu zaimplementowanie układów pomiarowych o bardzo rozległych sieciach czujników (rzędu kilku tysięcy i więcej). Celem tych prac jest stworzenie systemów SHM, które analogicznie do układu nerwowego człowieka (nerwy jako czujniki, mózg jako jednostka przetwarzająca informacje w czasie rzeczywistym), umożliwią monitorowanie całych konstrukcji technicznych, [10, 99, 9, 97].



Rys. 3.11. Okablowanie strukturalne dla czujników tensometrycznych (a) oraz światłowodowych – zaznaczone okręgiem (b) (na podst. [96]).

Przykładem prac mających na celu zaimplementowanie systemu monitorowania konstrukcji z wykorzystaniem dużej liczby czujników jest praca [96]. Opisano tam układ pomiarowy składający się z 3000 punktów pomiarowych, bazujących na światłowodowych siatkach Bragga, wykorzystany do monitorowania stanu odkształceń skrzydła samolotu transportowego. W pracy przedstawione zostały badania statyczne kompozytowego skrzydła o długości ponad 12-tu metrów, wykonanego z kompozytu węglowo-epoksydowego ze wstawkami wykonanymi z kewlaru. Jako metodę referencyjną wykorzystano układ składający się z 466 foliowych czujników tensometrycznych. Powyżej (Rys. 3.11) przedstawiono porównanie ilości okablowania strukturalnego wykorzystanego przy wyprowadzeniu sygnału z czujników tensometrycznych (Rys. 3.11a) oraz światłowodowych (Rys. 3.11b). W celu realizacji badań zaprojektowano oraz wykonano nowatorski układ do pomiaru wielu czujników FBG w jednym włóknie. System ten jest oparty na pomiarach reflektometrycznych w dziedzinie częstotliwości (ang.: Optical Frequency

Domain Technique, OFDR) i umożliwia równoczesny odczyt sygnałów pochodzących z 4 głowic pomiarowych. Każda z zastosowanych głowic ma długość 8 metrów i zawiera w sobie 800 czujników, oddalonych od siebie o 1 cm.

Uzyskane z dwóch różnych systemów pomiarowych rezultaty były bardzo zbliżone. Ponadto zastosowany system światłowodowy wykazał możliwości znacznej redukcji ciężaru kompletnego układu pomiarowego przy równoczesnym zwiększeniu liczby punktów pomiarowych. Umożliwia to tym samym dokładniejsze odwzorowania zachowań konstrukcji w warunkach rzeczywistych obciążeń. Dodatkowo ze względu na niewielką liczbę kabli, system oparty na siatkach Bragga okazał się być znacznie prostszy w instalacji w porównaniu do systemu tensometrycznego [96].

3.3 Zbiorniki ciśnieniowe

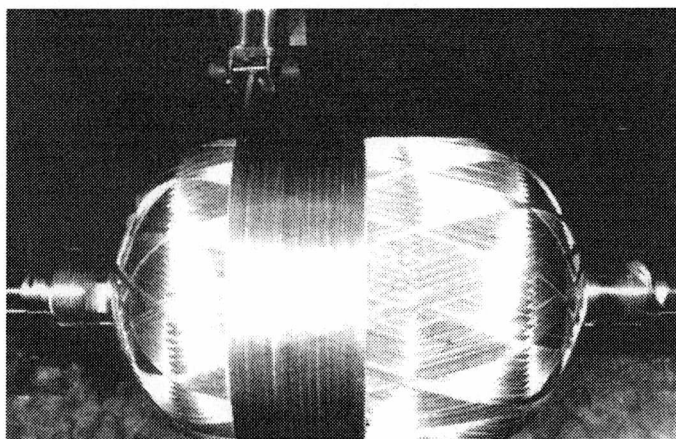
Jak już wspomniano we wstępie niniejszej pracy, nowoczesne wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe znajdują obecnie zastosowanie w wielu obszarach techniki. Stosowane są między innymi do gromadzenia paliw gazowych (wodór, metan), osiągając ciśnienia pracy dochodzące do 700 barów w przypadku zbiorników wodorowych, a w przypadku zbiorników CNG – do 200 barów.

Połączenie wysokowyężonej kompozytowej konstrukcji nośnej zbiornika wraz z niebezpieczną substancją jaką jest sprężony wodór lub metan, powoduje iż monitorowanie stanu technicznego takich obiektów staje się koniecznością. W chwili obecnej normy wymagają, by zbiorniki były poddawane okresowym badaniom kontrolnym dopuszczającym je do dalszej eksploatacji, jednakże bez konieczności instalowania na stałe systemów typu SHM. Tak sformułowane regulacje powodują, że producenci zbiorników preferują zwiększenie ilości stosowanego materiału wzmacniającego konstrukcję, zwiększając tym samym jej bezpieczeństwo, niż ich optymalizację od strony konstrukcyjnej. Prowadzi to do zwiększenia kosztów produkcji i ceny produktu końcowego. Jednakże prowadzone obecnie prace, np.: [100, 101], mają na celu między innymi wywarcie presji na organach ustawodawczych i wprowadzenie uregulowań prawnych, które w przypadku produkcji zbiorników ze zintegrowanym systemem ciągłej kontroli jego stanu technicznego, pozwolą obniżyć stosowane obecnie wysokie współczynniki bezpieczeństwa. Standardowe metody NDE (ang.: Non-destructive Evaluation), takie jak: elastooptyka, holografia interferometryczna, radiografia, skanowanie ultradźwiękowe, emisja akustyczna czy też wizualna inspekcja, nie sprawdzają się w procesie monitorowania "on-line", [88, 101, 102]. System sensorów powinien zapewnić ocenę stanu technicznego butli zarówno w czasie produkcji, ale przede wszystkim podczas długotrwałej eksploatacji.

Realizowane badania, np.: [101, 102, 8, 103, 100, 104, 105, 106, 107], pokazują, iż najlepszym z alternatywnych rozwiązań jest zastosowanie do tego celu czujników świa-

tłowodowych. Wynika to przede wszystkim z odporności na zakłócenia elektromagnetyczne, iskrobezpieczeństwo, łatwości ich integracji ze strukturą materiału kompozytowego, a także dużej czułości w szerokim zakresie pomiarowym. Czujniki te zainstalowane na stałe na powierzchni zbiornika, bądź też wbudowane w strukturę materiału kompozytowego, umożliwiają ciągłą kontrolę stanu technicznego konstrukcji w trakcie całego okresu eksploatacyjnego.

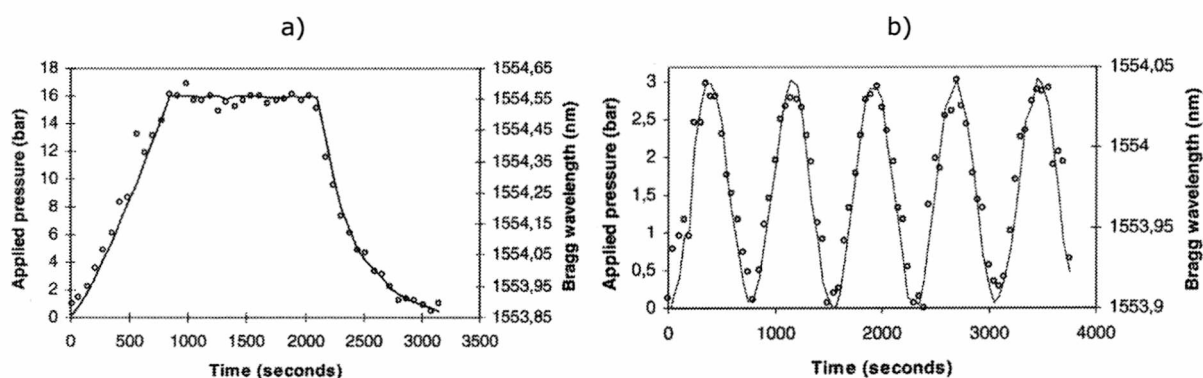
W jednej z pierwszych prac [101], dotyczących aplikacji czujników światłowodowych do monitorowania stanu technicznego zbiorników testowych (ang.: Standard Testing and Evaluation Bottles, STEBs), zastosowano czujniki FBG, które zostały zintegrowane z nawijaną kompozytową warstwą nośną w trakcie jej wytwarzania. Czujniki te były przeznaczone do pomiarów stanu odkształceń oraz temperatury zbiornika w trakcie utwardzania żywicy epoksydowej oraz quasi-statycznych testów ciśnieniowych. W pracy przeprowadzono analizę mikrograficzną przekrojów kompozytowej powłoki nośnej zawierającej światłowód, pokazując dobrą współpracę pomiędzy nimi oraz brak defektów, które mogłyby powstać w obszarach zawierających czujnik. Czujniki były umiejscowione w kilku obszarach zbiornika, m.in. w części cylindrycznej oraz na dennicach. Za każdym razem były one lokalizowane w kierunku zgodnym z kierunkiem wzmocnienia, a tym samym były nawinięte pod różnymi kątami względem osi głównej zbiornika. Dodatkowo jako czujniki referencyjne zastosowane zostały tensometry rezystancyjne oraz termopary. Tensometry zostały zainstalowane na powierzchni zewnętrznej zbiornika po procesie utwardzania żywicy, w sąsiedztwie światłowodowych siatek Bragga. Przeprowadzone badania wykazały zgodność wyników uzyskanych zarówno pomiędzy różnymi czujnikami odkształceń, jak i przeprowadzonymi obliczeniami. W zależności od kierunku nawijania oraz lokalizacji, różnica pomiędzy FBG a tensometrami, jak i modelem numerycznym MES, wynosiła od 1,1% (na części cylindrycznej zbiornika) do 24% (na dennicach).



Rys. 3.12. Wytwarzanie zbiornika kompozytowego metodą nawijania z wbudowanymi w strukturę nośną czujnikami FBG (na podst.: [102]).

W kolejnej pracy [102], autorzy przeprowadzali badania nad możliwością zastosowania światłowodowych siatek Bragga do monitorowania odkształceń elementów wykonanych z materiałów kompozytowych, w tym laminatów i zbiorników ciśnieniowych wykonanych metodą nawijania. Prace zostały zrealizowane w kilku etapach. W pierwszym z nich przeprowadzono próby rozciągania i temperaturowe na nieosłoniętym włóknie światłowodowym z czujnikiem FBG. Następnie wykonany został laminat węglowo-epoksydowy z umiejscowioną pomiędzy warstwami światłowodową siatką Bragga, który poddano statycznej próbie trzypunktowego zginania.

Ostatecznie techniką nawijania włókna szklanego wykonany został zbiornik ciśnieniowy, w którym wraz z ostatnią warstwą wzmocnienia (w kierunku obwodowym), równolegle do niej, nawinięty został światłowód z siatką Bragga (Rys. 3.12). Wyprodukowany zbiornik został następnie poddany badaniom. W pierwszej próbie obciążony został on statycznie ciśnieniem wewnętrznym w zakresie od 0 do 16 barów (Rys. 3.13a), a następnie cyklicznej w zakresie od 0 do 3 barów (Rys. 3.13b). W obydwu próbach zmiana ciśnienia spowodowała przesunięcie fali Bragga, odbitej od czujnika wbudowanego w strukturę kompozytowej warstwy nośnej. W rezultacie stwierdzono, iż czujniki FBG idealnie nadają się do pomiarów odkształceń materiałów kompozytowych, będąc umiejscowionymi bezpośrednio w strukturze materiału, a ponadto są obiecującą techniką z zakresu badań nieniszczących i oceny stanu technicznego elementów kompozytowych [102].

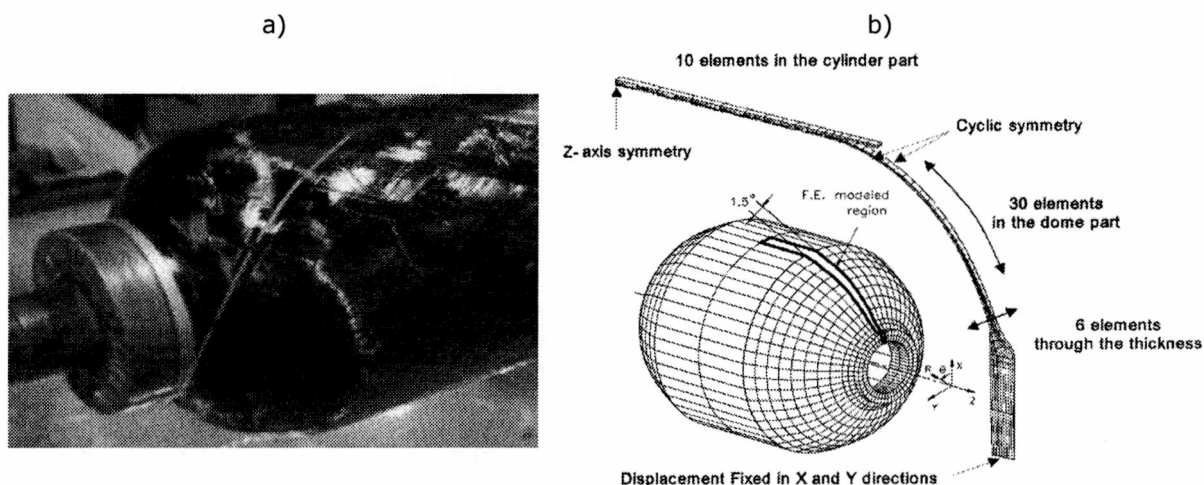


Rys. 3.13. Przykładowe wyniki pomiarów zmian długości fali Bragga pod wpływem zmian ciśnienia wewnętrznego w zbiorniku w funkcji czasu trwania eksperymentu dla próby statycznej (a) oraz cyklicznej (b) (na podst.: [102]).

Aspekt przydatności stosowania czujników światłowodowych (FBG) do monitorowania ciśnieniowych zbiorników kompozytowych, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości ich integracji z warstwą nośną w trakcie produkcji zbiornika metodą nawijania, jest również tematem pracy [8].

Autorzy opisują w niej m.in. problemy z jakimi spotkali się w trakcie osadzania głowic pomiarowych, wykonanych metodą spawania kolejnych czujników FBG do siebie, w ma-

teriale kompozytowym. W zbiorniku z tak przygotowanymi czujnikami proces wytwarzania (nawijanie, utwardzanie w wysokiej temperaturze) przetrwała jedynie jedna głowica z czterech. Okazało się, że włókna spawane, ze względu na niską odporność na naprężenia poprzeczne w miejscu spawu, są zbyt mało odporne na warunki panujące w trakcie procesu produkcyjnego zbiornika i tym samym znacząco wzrasta ryzyko uszkodzenia światłowodu w trakcie nawijania wzmocnienia. Widok zbiornika w trakcie nawijania oraz jego model numeryczny przedstawiono na Rys. 3.14.

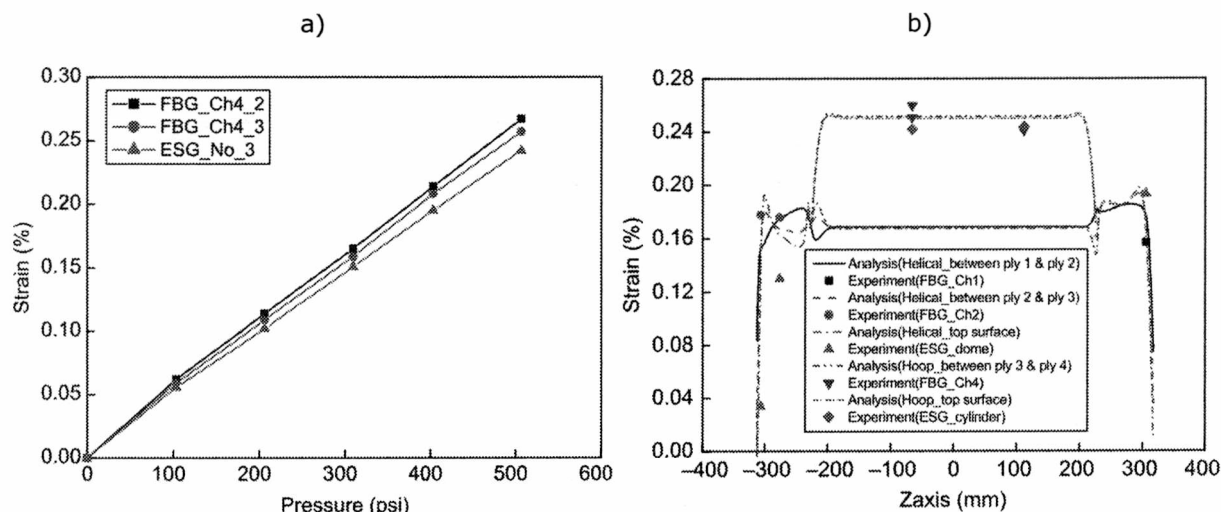


Rys. 3.14. Widok ciśnieniowego zbiornika kompozytowego ze zintegrowanymi czujnikami FBG w trakcie procesu nawijania (a) oraz jego model numeryczny (b) (na podst.: [8]).

Znacząco lepiej sprawdziły się głowice pomiarowe składające się z kilku czujników wytworzonych bezpośrednio w jednym odcinku światłowodu, zabezpieczonego dodatkowo cienką warstwą ochronną. Dla tak przygotowanych głowic procent czujników, które nadawały się do pomiarów po procesie produkcji zbiornika wzrósł do ~79% (11 czujników z 14-tu było dostępnych). Porównując widmo odbiciowe dla zbiornika przed procesem wygrzewania z widmem uzyskanym dla zbiornika gotowego do badań ciśnieniowych, możliwym było wyznaczenie lokalnych odkształceń resztkowych. We wszystkich punktach pomiarowych zarejestrowano lokalne ściskanie w zakresie od -140 do $-580 \mu\epsilon$ [8].

Następnie zbiornik testowy poddano próbie ciśnieniowej do zniszczenia. W celach referencyjnych na powierzchni zbiornika zainstalowano czujniki tensometryczne. Czujniki uległy uszkodzeniu przed rozerwaniem zbiornika. Maksymalne zarejestrowane przez światłowodowe siatki Bragga odkształcenia wynosiły 0,95% dla ciśnienia 2900 psi (~200 barów). Ponadto zarejestrowano także zjawisko rozdzielania się fali Bragga na kilka pików, co było zapewne wynikiem przemieszczenia się czujnika względem pozycji ustalonej w trakcie nawijania (czujnik nie był usytuowany równolegle z włóknami wzmocnienia). Uzyskane wyniki z pomiarów odkształceń (Rys. 3.15a) zostały porównane z wynikami uzyskanymi z symulacji numerycznych (Rys. 3.15b). Odkształcenia mierzone przez FBG

oraz tensometry w warstwie obwodowej na części cylindrycznej zbiornika są zgodne z danymi uzyskanymi z symulacji FEM, jednakże na dennicach występują rozbieżności. Związane jest to ze ślizganiem się włókna w trakcie procesu utwardzania oraz zbyt dużą długością bazy pomiarowej zastosowanych czujników [8].

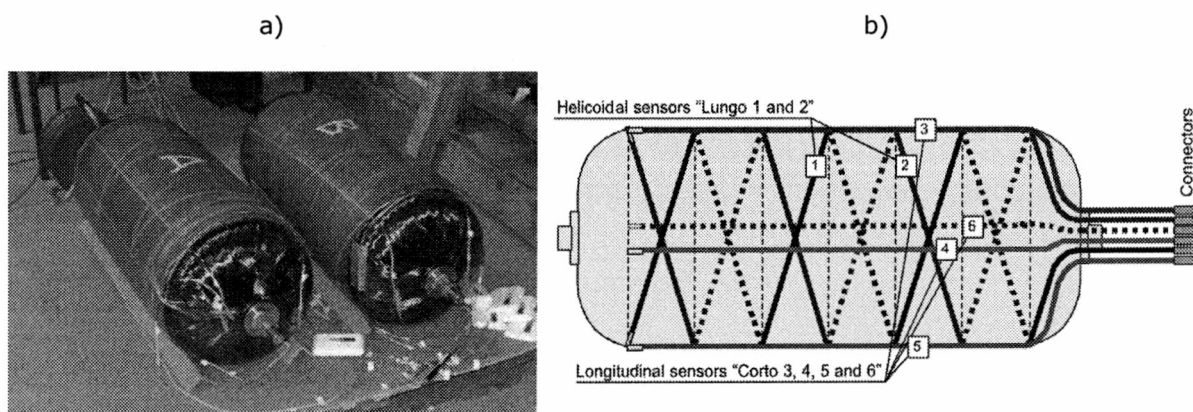


Rys. 3.15. Odształcenia zbiornika kompozytowego zarejestrowane przez czujniki FBG oraz tensometryczne w funkcji ciśnienia wewnętrznego w trakcie quasi-statycznej próby ciśnieniowej (a) oraz rozkład odkształceń w zbiorniku przy ciśnieniu wewnętrznym 500 psi ($\sim 34,5$ bar) zarejestrowany przez czujniki oraz wyznaczony na podstawie obliczeń numerycznych dla przyjętego modelu (b) (na podst.: [8]).

Niezawodność oraz bezpieczeństwo stosowanych zbiorników kompozytowych ze zintegrowanym systemem SHM jest również powodem prac realizowanych przez Hao i innych [108]. W pracy zaproponowali oni stworzenie systemu monitorującego odkształcenia obwodowe i wzdłużne zbiornika testowego wykonanego z kompozytu szklano-epoksydowego z wykorzystaniem trzech czujników światłowodowych FBG, zainstalowanych na jego powierzchni. Dodatkowo zastosowano dwa czujniki tensometryczne, realizujące lokalny pomiar odkształceń w kierunkach obwodowym i wzdłużnym. Testowy zbiornik o grubości ścianki nośnej wynoszącej 3,2 mm był obciążany statycznie od ciśnienia 0 do ~ 200 bar. Uzyskane wyniki pomiarowe charakteryzowały się dobrą zbieżnością w przypadku odkształceń rejestrowanych w kierunku wzdłużnym, szczególnie w niskim zakresie ciśnień (do 8 barów), oraz bardzo dużymi rozrzutami w przypadku odkształceń obwodowych. Różnice pomiędzy czujnikami FBG a tensometrycznymi wynosiły nawet blisko 60 %, pomimo iż czujniki były oddalone od siebie maksymalnie o 12 mm. Według autorów jest to związane z różnymi odległościami czujników od defektu, wokół którego doszło do rozerwania zbiornika [108].

Gliścić i inni [106] przedstawili możliwości aplikacyjne systemu monitorującego stan techniczny zbiorników kompozytowych typu 4-go (tzw. „full composite”, liner polimero-

wy, wzmocnienie węglowo-epoksydowe) do gromadzenia sprężonego metanu w samochodach, o nominalnym ciśnieniu pracy 350 barów. Zaproponowany układ pomiarowy bazujący na czujnikach interferometrycznych typu SOFO®. Czujniki te charakteryzują stosunkowo długie ramiona pomiarowe, które uśredniają mierzoną wielkość odkształceń po całej swojej długości. Celem realizowanych w ramach europejskiego projektu ZEM badań (5-th EU Framework Program), było opracowanie topologii rozmieszczenia czujników na zbiorniku oraz odpowiedniego algorytmu analizującego dane pomiarowe, umożliwiających detekcję lokalnych defektów, mogących zagrozić bezpieczeństwu użytkowników [106].

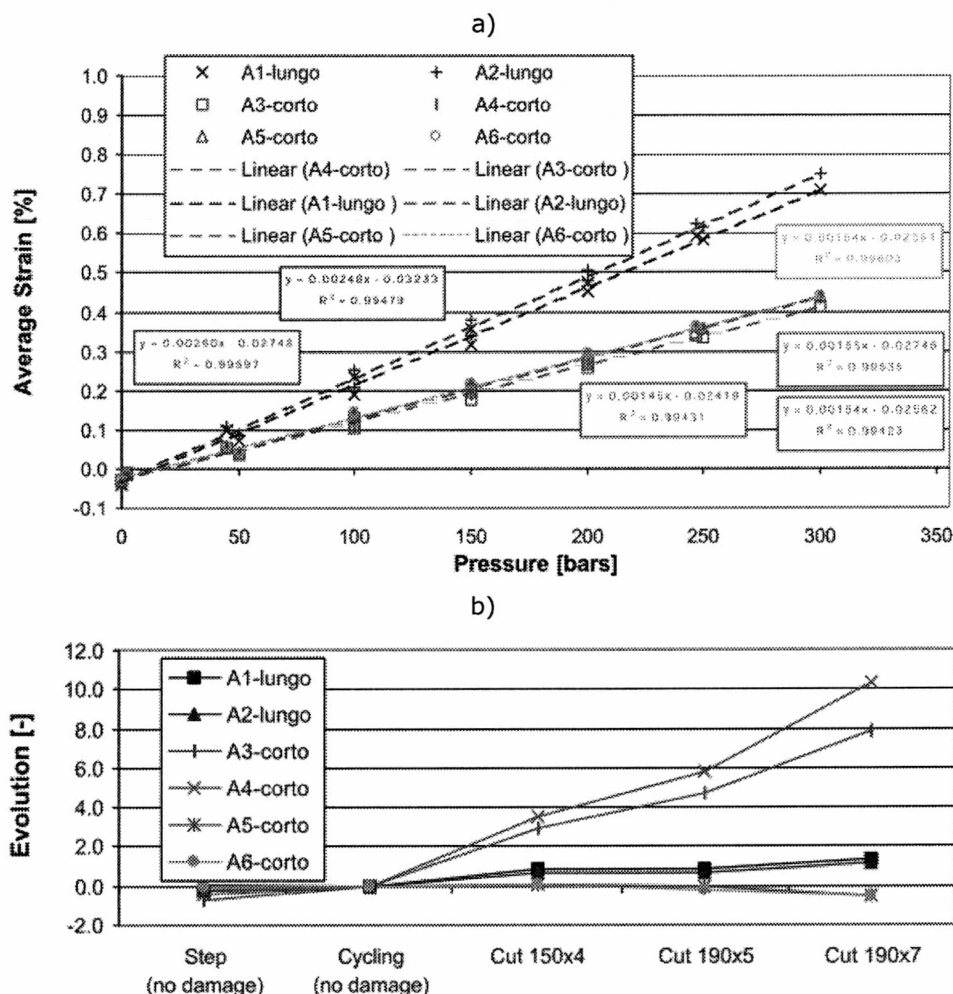


Rys. 3.16. Widok zbiorników kompozytowych typu 4-tego, z zainstalowanymi czujnikami światłowodowymi SOFO®, przeznaczonych do gromadzenia CNG (a) oraz schemat rozmieszczenia czujników na zbiorniku testowym (b) (na podst.: [106]).

Czujniki światłowodowe w postaci tzw. SMARTape® zostały zintegrowane z konstrukcją zbiornika i umiejscowione pomiędzy ostatnią warstwą węglową oraz pierwszą szklaną. Widok przygotowanych do badań zbiorników oraz rozmieszczenie czujników SOFO® przedstawiono powyżej (Rys. 3.16). Czujniki interferometryczne umożliwiały pomiar odkształceń w kierunku wzdłużnym (4 sztuki umieszczone co 90° po obwodzie) oraz w kierunku obwodowym (śrubowym) – 2 sztuki o przeciwnym kącie nawoju.

Autorzy zaproponowali algorytm analizy danych pomiarowych („strategię monitorowania”), który umożliwiał wykrywanie różnych nieprawidłowych zachowań zbiornika oraz pojawiających się w konstrukcji defektów. Pierwszym założeniem było, iż w przypadku uszkodzenia, testowy zbiornik stanie się bardziej podatny na odkształcenia (dla stałej wartości ciśnienia), co oznacza że nachylenie prostej odkształcenie-ciśnienie zmieni się. Ponadto założono, że lokalny defekt może być przyczyną lokalnych deformacji zbiornika (np. owalizacji, wyginania), co z kolei będzie zarejestrowane przez pary czujników SOFO® rozmieszczonych symetrycznie na jego powierzchni. Ostatnie z przyjętych założeń pozwalało analizować korelację pomiarów pomiędzy wybranymi czujnikami. W przypadku

defektu, liniowa zależność odkształceń rejestrowanych przez jeden czujnik w funkcji odkształceń drugiego, ulegnie zakłóceniu i zmieni się [106].



Rys. 3.17. Wyniki badań testowych zbiorników CNG z zainstalowanymi czujnikami światłowodowymi typu SOFO®:

- zmiana odkształceń wzdłużnych i obwodowych pod wpływem zmian ciśnienia wewnętrznego w zakresie od 0 do 300 barów,
- wykrywanie defektów w zbiorniku z uszkodzeniami programowanymi poprzez analizę zmian współczynnika podatności względnej, (na podst.: [106]).

W celu potwierdzenia powyższych założeń przeprowadzona została seria badań statycznych i quasi-statycznych na zbiornikach nowych oraz z programowanymi defektami (w postaci nacięć o różnych wymiarach geometrycznych i delaminacji) w zakresie od 0 do maksymalnie 350 barów. Przykładowe wyniki zmiany odkształceń zbiornika testowego w funkcji ciśnienia wewnętrznego przedstawiono na Rys. 3.17a. Należy zauważyć, iż wzrost ciśnienia testowego, powoduje liniowy wzrost mierzonych odkształceń. Wartości odkształceń, rejestrowane w poszczególnych kierunkach przez pary czujników syme-

trycznych, mają zbliżone wartości, co świadczy m.in. o tym, że nie występowała owalizacja zbiornika. Na Rys. 3.17b przedstawiono wpływ defektów programowanych na współczynnik podatności względnej, który świadczy o pojawieniu się lokalnego uszkodzenia w obszarze zbiornika.

Autorzy pracy [106] wskazują, iż wzrost takich parametrów jak podatność na odkształcenia, czy też współczynnika podatności względnej, a także zmiana we wzajemnej liniowej zależności pomiędzy poszczególnymi czujnikami, jest wskaźnikiem uszkodzenia zbiornika.

3.4 Kompozytowe elementy magnetyczne typu SMART

Materiały magnetyczne typu SMART (ang.: Smart Magnetic Materials, SMM) to materiały aktywne, które w ostatnich latach są coraz częściej i szerzej stosowane m.in. w lotnictwie, marynarce, przemyśle samochodowym, inżynierii lądowej, oraz wielu innych dziedzinach [109]. Jedną z grup tychże materiałów stanowią tzw. materiały o gigantycznej magnetostrykcji (ang.: Giant Magnetostrictive Materials, GMM). Pozwalają one na przekształcanie energii magnetycznej w mechaniczną oraz mechanicznej w magnetyczną, z bardzo dużym współczynnikiem sprawności. Od kilku lat realizowane są prace, np. [110, 111, 112], których celem jest wytworzenie nowych materiałów w postaci kompozytów magnetostrykcyjnych, które będą mogły przybrać różne formy, m.in. prętów, czy laminatów, a tym samym uwolnią konstruktorów nowych urządzeń od wad i ograniczeń materiałów litych (np. prądy wirowe, kruchość, cena).

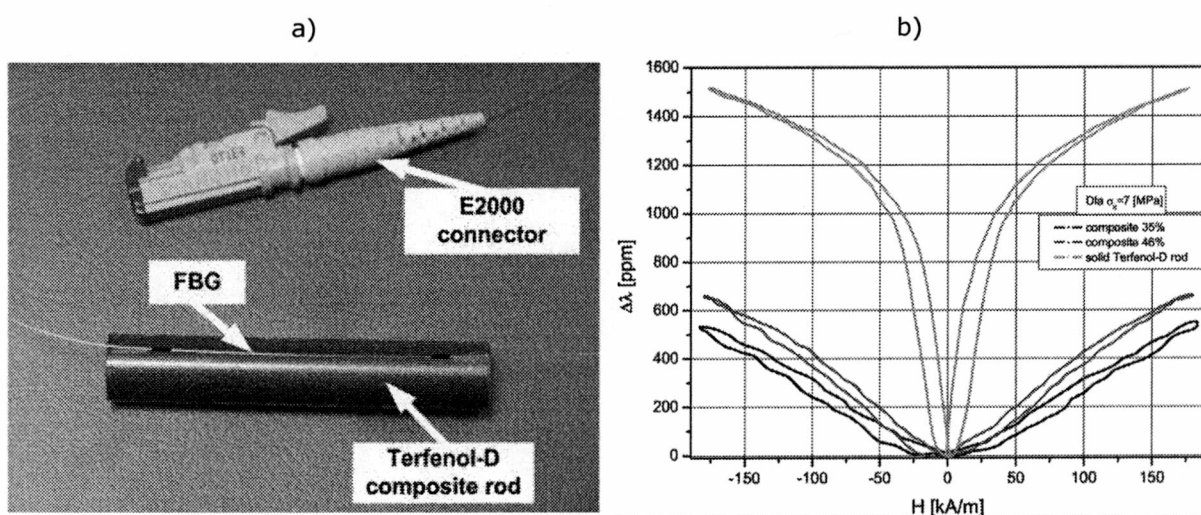
Podstawowe badania jakim poddaje się zarówno monolityczne materiały o gigantycznej magnetostrykcji, takie jak Terfenol-D czy też kompozyty zawierające takie materiały, jest badanie ich właściwości magnetomechanicznych. Parametrami opisującym te właściwości jest magnetostrykcja (odkształcenie ferromagnetyka pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego) czy też efekt odwrotny, czyli tzw. efekt Villariego. W obydwu przypadkach standardowe metody pomiaru odkształceń, na przykład z wykorzystaniem ekstensometrów czy czujników tensometrycznych, są praktycznie niemożliwe. Jest to bardzo istotne, gdyż często ze względów konstrukcyjno-aplikacyjnych materiały GMM znajdują się wewnątrz cewek (lub nawet stanowią ich rdzeń), a występujące tam silne zmiany pól E-M zakłócają pomiar.

Dlatego też idealnym rozwiązaniem w pomiarach parametrów mechanicznych materiałów magnetycznych (w tym również materiałów GMM) są czujniki światłowodowe. Są one z założenia odporne na wszelkie zakłócenia elektromagnetyczne, a ponadto umożliwiają rejestrację odkształceń z dokładnością dochodzącą do 1 $\mu\epsilon$.

W pracach [110, 111] autorzy wykorzystali czujniki FBG do pomiarów odkształceń prętów wykonanych z litego Terfenolu-D oraz prętów kompozytowych, wykonanych na

bazie żywicy epoksydowej oraz sproszkowanego Terfenolu-D. Czujniki światłowodowe zostały zainstalowane na powierzchni próbek w kierunku wzdłużnym oraz obwodowym, umożliwiając tym samym pomiar magnetostrykcji w dwóch kierunkach (Rys. 3.18a).

Opisane we wspomnianych pracach [110, 111] badania statyczne, miały na celu określenie właściwości magnetomechanicznych prętów wytworzonych z kompozytów GMM, jak i litego Terfenolu-D. Wyznaczone zostały wartości magnetostrykcji w zależności od procentowego udziału fazy magnetycznej w materiale (Rys. 3.18b). Uzyskane rezultaty potwierdziły, iż magnetostrykcja badanych próbek kompozytowych jest znacznie mniejsza w porównaniu do materiału monolitycznego, ale równocześnie jest ok. 30 razy większa niż w przypadku niklu (materiału referencyjnego) [110].



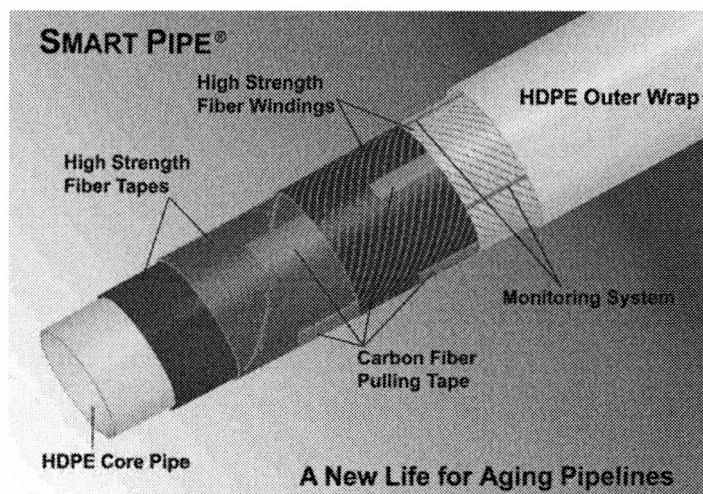
Rys. 3.18. Kompozytowa próbka zawierająca sproszkowany Terfenol-D z zainstalowanym czujnikiem światłowodowym (a) oraz zmiana magnetostrykcji wzdłużnej pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego dla różnych rodzajów próbek: kompozytowych i litych, zarejestrowana przez czujnik FBG (b) (na podst.: [110, 111]).

3.5 Rurociąg kompozytowy

Kolejnym przykładem zastosowania czujników światłowodowych jest ich aplikacja do monitorowania stanu wyężenia oraz wykrywania przecieków (rozszerzenia) rurociągów, w tym także rurociągów kompozytowych.

Doskonałym przykładem kompleksowego podejścia do tematu wytwarzania nowoczesnych konstrukcji, bazujących na wysokowytrzymałych materiałach wraz ze zintegrowanym systemem monitorowania są rurociągi wytwarzane przez amerykańską firmę SmartPipe [113]. Konstrukcja kompozytowego rurociągu SmartPipe® (Rys. 3.19) została opracowana z myślą o naprawie istniejących konstrukcji przeznaczonych do przesyłu gazu ziemnego oraz ropy naftowej, które ze względu na swój wiek oraz związane z nim zużycie (np. postępująca korozja) wymagają ingerencji służb odpowiedzialnych za ich

utrzymanie. Obecnie znajduje ona również coraz szersze zastosowanie w budowie nowych linii przesyłowych [114, 115].



Rys. 3.19. Schemat budowy rurociągu SmartPipe® [113].

Cechą szczególną podkreślaną przez producenta jest zastosowanie ultrawytrzymałych włókien węglowych, szklanych oraz aramidowych, które nawinięte są na rdzeniu w postaci rury wykonanej z polietylenu o dużej gęstości. Pomiedzy wyplatanyimi warstwami kompozytowymi umieszczone zostały rozložone czujniki światłowodowe w postaci tzw. SMARTprofili (Rys. 3.20a). Dobór odpowiednich materiałów (rodzaj włókna lub tkaniny), ich struktury (kąty wyplatania), a także zastosowanego systemu monitorowania stanu technicznego (czujniki OFS) pozwala na wykonie rurociągu dostosowanego do indywidualnych potrzeb zamawiającego z uwzględnieniem ciśnienia pracy, metody i miejsca instalacji, okresu użytkowania, itp.

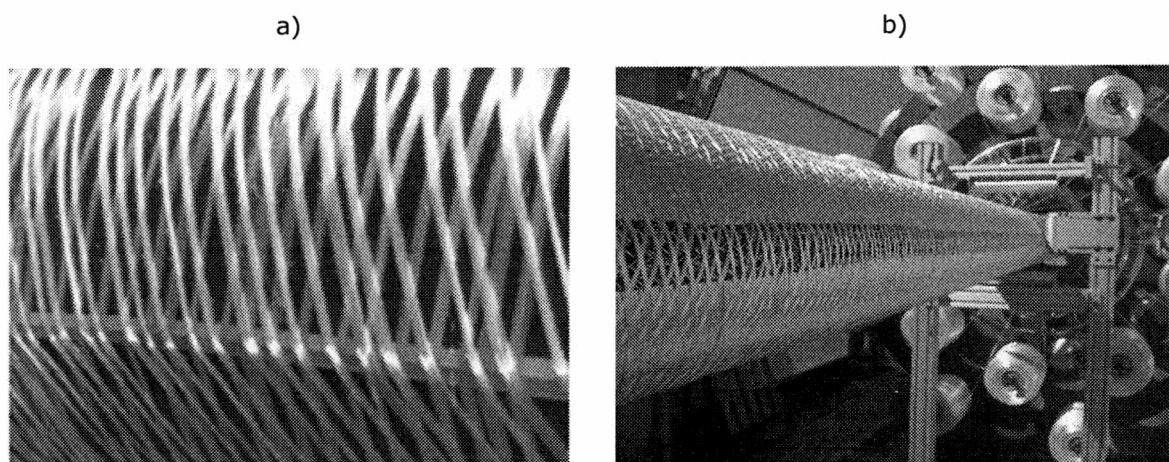
Renowacja wyeksploatowanych rurociągów jest procesem bardzo kosztownym zwłaszcza w obszarach zaludnionych, gdzie rurociągi instalowane są najczęściej pod powierzchnią ziemi. Poza ceną nowego rurociągu należy doliczyć również koszty zatrzymania przesyłu (zatrzymana eksploatacja), a także rozkopania rowów i ułożenia nowego rurociągu.

Idea renowacji istniejących rurociągów z wykorzystaniem konstrukcji firmy SmartPipe polega na wprowadzeniu do istniejącej rury odpowiednio złożonego w kształt litery „C” nowego fragmentu rurociągu, który po rozłożeniu dopasuje się kształtem do istniejącej konstrukcji. W celu instalacji wymagany jest jedynie stosunkowo niewielki wykop, pozwalający na swobodny dostęp do poddawanego renowacji rurociągu. Skraca to znacząco cały proces, a tym samym znacząco zmniejsza koszty renowacji. „Nowy” rurociąg charakteryzuje się co najmniej takim samymi, a często nawet lepszymi, parametrami pracy (nominalne ciśnienie, prędkości przepływu) pomimo zmniejszenia średnicy wewnętrznej.

Zintegrowany system bazujący na rozłożonych czujnikach światłowodowych umożliwia operatorowi rurociągu na ciągły monitoring stanu technicznego konstrukcji. Zastosowa-

nie systemów bazujących na pomiarze rozproszonego widma Brillouina pozwala na kontrolowanie stanu odkształceń rurociągu oraz temperatury wzdłuż całej jego długości. Ma to szczególne znaczenie w obszarach sejsmicznych oraz obszarach o dużej niestabilności warstwy gruntowej. Ponadto pomiar temperatury umożliwia wykrywanie i lokalizację miejsc rozszczelnienia rurociągu. Systemy pomiarowe wykorzystujące rozpraszanie Ramana umożliwiają natomiast jedynie rozłożony pomiar temperatury, a tym samym lokalizację wycieków [10].

Rurociągi SmartPipe® mogą być wytwarzane bezpośrednio w miejscu ich instalacji w odcinkach o długościach dochodzących do 15 km. Prędkość instalacji może wynosić nawet 1,5 km/dzień. Ze względu na brak w konstrukcji elementów metalowych są całkowicie odporne na korozję. Dzięki temu nie wymagają one tak częstych renowacji jak rurociągi wykonane z rur stalowych, co znacząco obniża koszty ich utrzymania [113].



Rys. 3.20. Rozłożony czujnik światłowodowy SMARTprofile® zintegrowany z konstrukcją (a) oraz proces wyplatania rurociągu kompozytowego (b) [114].

4 Badania próbek kompozytowych; wybrane przykłady

Włókniste kompozyty polimerowe, ze względu na swoje liczne zalety, znajdują coraz to szersze zastosowania w produkcji elementów ciśnieniowych, w tym m.in. rurociągów i zbiorników ciśnieniowych. Standardowo elementy te wytwarza się metodą nawijania włókna (w postaci rowingu) szklanego bądź węglowego, na rdzeń bądź liner kołowo symetryczny przy użyciu tzw. nawijarek. Alternatywną metodą jest wytwarzanie elementów kompozytowych metodą wyplatania. W tym celu stosowane są ramy wyplatające, które przystosowane do ciągłego wytwarzania rękawów wprost na rdzeniu. Zastosowanie maszyn sterowanych numerycznie zintegrowanych z manipulatorami (ang.: Computerized Numerical Control, CNC), umożliwia automatyzację procesu wytwarzania elementów kompozytowych, w tym również ich produkcję seryjną, co w konsekwencji umożliwia obniżenie kosztów produktu końcowego.

W ramach niniejszej pracy, wspomniane powyżej metody wytwarzania elementów kompozytowych, zastosowane zostały do produkcji próbek, w tym próbek rurowych oraz NOL. Zrealizowane przy ich pomocy badania umożliwiły sprawdzenie przydatności czujników światłowodowych w pomiarach odkształceń elementów kompozytowych, zbliżonych geometrycznie do zbiorników (część cylindryczna) oraz obciążanych ciśnieniem wewnętrznym. Zrealizowano badania na próbkach z programowanymi defektami w postaci uszkodzeń lineru i kompozytowej warstwy nośnej, a ponadto sprawdzono możliwość wyznaczenia momentu, w którym następuje uszkodzenie materiału kompozytowego w postaci efektu ścinania na granicy faz (włókno wzmocnienia – matryca). Znacząca część badań poświęcona została badaniom quastatystycznym oraz na pełzanie próbek węglowo-epoksydowych typu NOL. W badaniach tych sprawdzono możliwość kalibracji światłowodowego układu pomiarowego przez równoczesną rejestrację emisji akustycznej, co umożliwiłoby rejestrację procesu kumulacji uszkodzenia struktury kompozytowej.

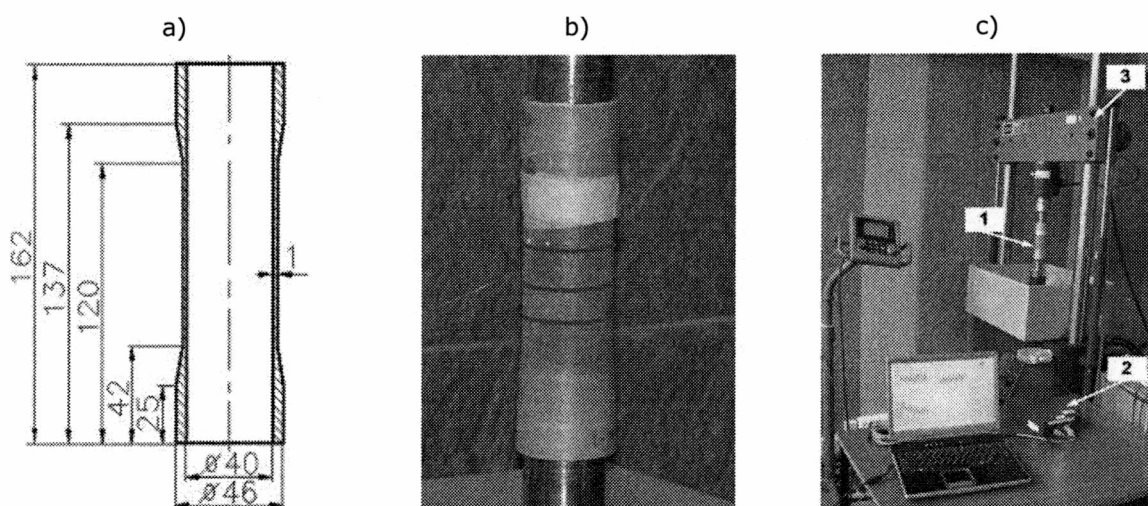
Dokładny opis realizowanych badań przedstawiono w kolejnych podrozdziałach.

4.1 Próbki rurowe wykonane metodą wyplotu

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 [116, 117]. Włókna warstwy kompozytowej ułożone są w sposób uporządkowany i zaprogramowany, stosownie do przewidywanych obciążeń konstrukcji. 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 [118].

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 obszarze dennicy wiązki włókien nie zsuwają się ponieważ podtrzymują się wzajemnie. Ponadto zastosowanie metody wyplatania stwarza znacznie większe możliwości wytwarzania opłotów nośnych zbiorników cylindrycznych, a mianowicie można wykonać opłot nośny od razu pod optymalnym kątem wynoszącym 54° .

Inną zaletą metody splatania jest łatwiejsza możliwość lokowania 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.



Rys. 4.1. Geometria kompozytowej próbki rurowej [5], szczegółowy widok próbki z naklejonymi czujnikami FBG oraz widok stanowiska pomiarowego (1 – próbka, 2 – urządzenie pomiarowe FBG, 3 – maszyna wytrzymałościowa).

Należy zwrócić uwagę, że kompozytowe opłoty nośne wykonane technikami wyplatania 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). W samym procesie splatania włókna ocierają się na sucho powodując wzajemne uszkodzenia. Także w celu polepszenia 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 w ten sposób splecione suche warstwy opłotu nośnego należy przesycić np. wykorzystując metodę RTM. Przesycanie

włókien jest mniej skuteczne od przesycania w wannie nasycającej na mokro, w czasie procesu nawijania, gdzie każda wiązka rowingu jest nasycana w sposób równomierny. Podobny proces sylenia włókien występuje w metodzie przeciągania (pultruzji), przy wytwarzaniu prętów i profili metodą ciągłą. Te wymienione i inne czynniki decydują o różnicy właściwości w otrzymywanych materiałach metodą nawijania i splatania [119]. Obiekty testowe w postaci próbek rurowych wykonane zostały metodą wyplotu włókna szklanego, przy użyciu splatarki znajdującej się w ILK Drezno. Po procesie wyplatania próbki zostały przesycane żywicą epoksydową i utwardzone. W badaniach wykorzystano próbki o trzech różnych kątach ułożenia wzmocnienia: 30° , 45° , 60° . Schemat geometrii oraz szczegółowy widok próbki przedstawiony został wyżej (Rys. 4.1).

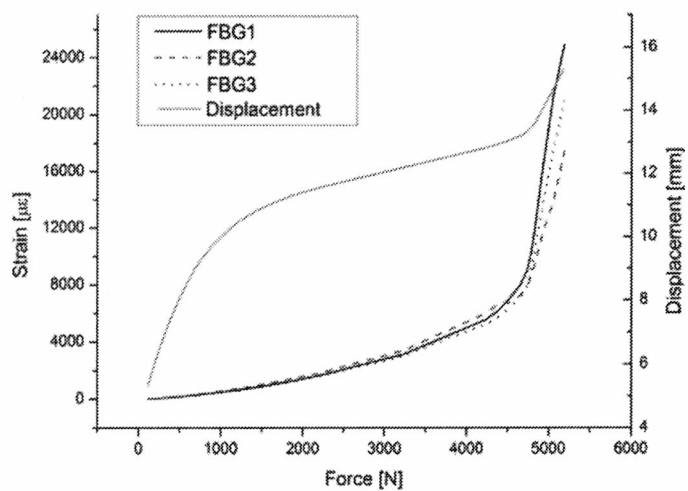
4.2 Badania próbek rurowych wykonanych metodą wyplotu

Badania próbek rurowych zrealizowano zgodnie ze sposobem III opisanym w pracy [120]. Metoda ta polega na ściskaniu, umieszczonych wewnątrz próbki rurowej, krążków wykonanych z elastomeru przy użyciu maszyny wytrzymałościowej MTS (Rys. 4.1c). Przeprowadzone analizy wykazały, iż taki sposób wymuszania obciążeń, zapewnia stan zbliżony do rozkładu naprężeń w obciążanym ciśnieniowo zbiorniku [120] (uzyskuje się w ten sposób jednoosiowy stan naprężeń – występują tylko naprężenia obwodowe). Metoda pozwala uzyskać wyniki zbieżne z rezultatami z badań przeprowadzonych cieżką. 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 cież roboczą (np. olej, woda).

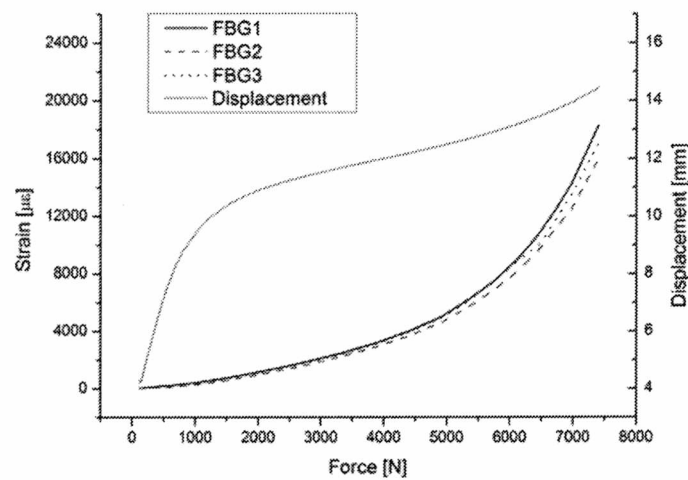
4.2.1 Wyniki badań statycznych

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. Jak już wcześniej wspomniano 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. 4.1b).

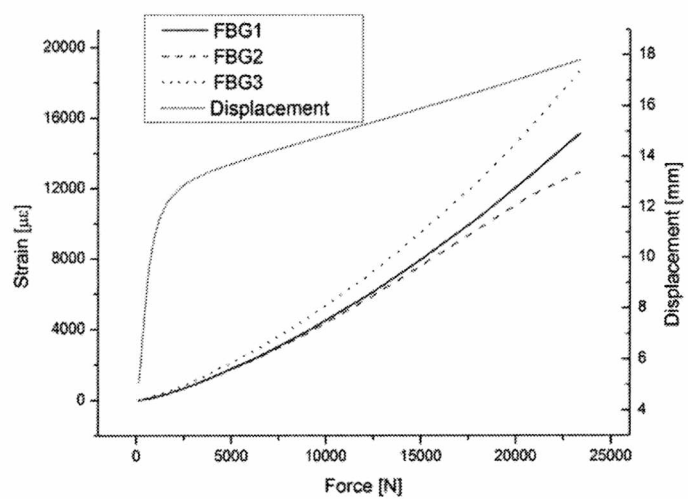
a)



b)



c)



Rys. 4.2. Zmiana odkształceń obwodowych oraz przemieszczenie tłoka maszyny wytrzymałościowej w funkcji przyłożonej siły dla próbek o geometrii 30° (a), 45° (b) oraz 60° (c).

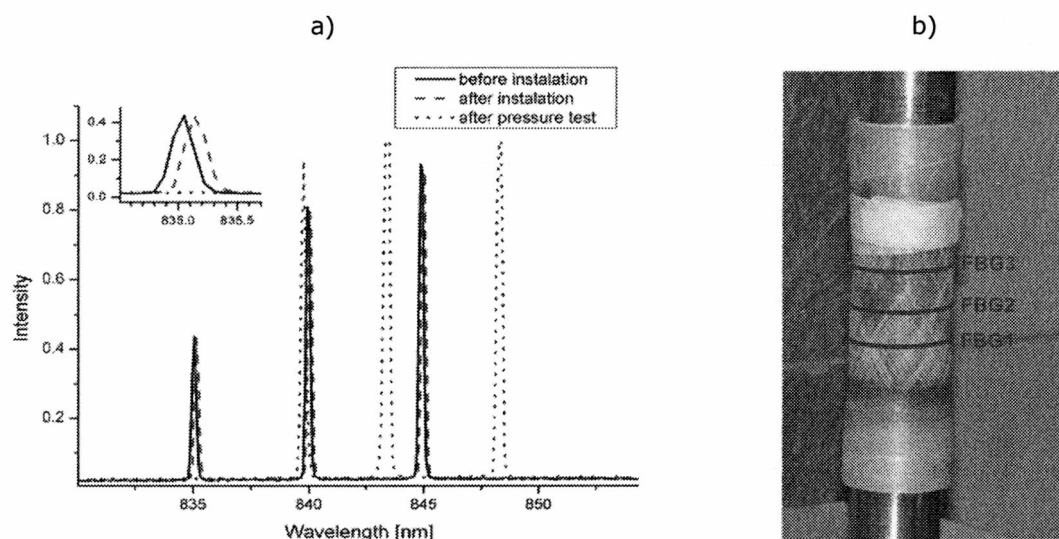
Szczegółowe wyniki pomiarowe uzyskane dla wybranej próbki o geometrii 30° zostały przedstawione powyżej (Rys. 4.2a). Uzyskane wykresy siła–przemieszczenie posiadały trzy charakterystyczne obszary. W początkowym etapie obciążania próbki (do ok. 1,2 kN) widoczny jest dość gwałtowny wzrost wartości przemieszczeń 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. Następnie nastąpiło właściwe ściskanie gumy powodujące powstanie jednoosiowego stanu naprężeń w materiale kompozytowym [121].

Powyżej wartości siły wynoszącej ok. 4,75 kN nastąpił gwałtowny wzrost wartości rejestrowanych odkształceń obwodowych (trzeci obszar charakterystyki siła – przemieszczenie). Spowodowane było to uszkodzeniem matrycy w kompozycie. Wystąpił 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 [120].

Dla porównania na rysunkach Rys. 4.2b oraz Rys. 4.2c 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 zmiany nachylenia charakterystyki siła–odkształcenie, związany zapoczątkowanym procesem degradacji matrycy epoksydowej. Na wykresie przedstawionym na Rys. 4.2c siła – przemieszczenie widoczny jest tylko jeden punkt zmiany kąta nachylenia, 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, co oznacza brak efektu ścięcia na granicy faz [119].

Na rysunku Rys. 4.3a 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 nm, 840 nm oraz 845 nm. W trakcie procesu klejenia czujników na próbce wprowadzono do nich niewielkie naprężenia wstępne. Na powiększeniu (Rys. 4.3a) widoczne jest niewielkie przesunięcie fali Bragga rzędu 0,09 nm.

Odpowiada to wstępnemu odkształceniu czujnika o 140 $\mu\epsilon$. Pozwalało to uniknąć sytuacji, w której czujnik pracowałby w tzw. strefie martwej, czyli rzeczywisty obiekt się odkształcał, a zainstalowany czujnik tego nie rejestrował.

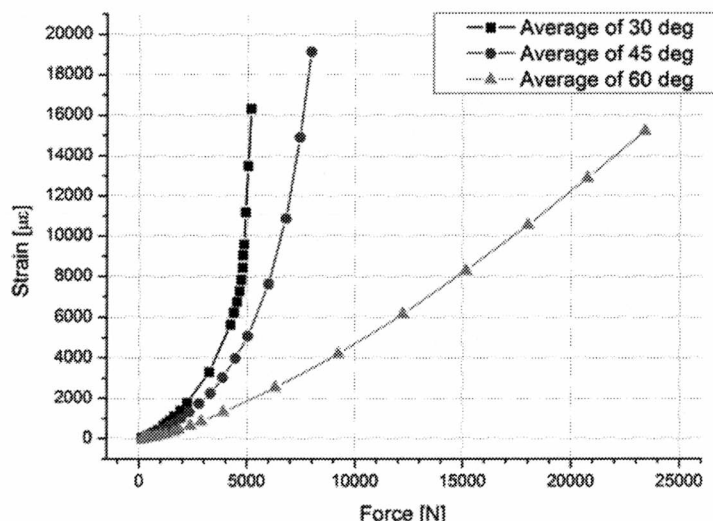


Rys. 4.3. Widmo odbiciowe pochodzące od trzech czujników FBG zainstalowanych na badanej próbce 30° (widoczne przesunięcie pików po badaniach świadczące o trwałym uszkodzeniu próbki), a także widok badanej próbki w momencie jej zniszczenia (widoczne zabielenie matrycy).

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 (zabielenie próbki widoczne na Rys. 4.3b), 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 Rys. 4.4 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, głównie na-

prężen obwodowych w rurze kompozytowej. Optymalny kąt ułożenia wzmocnienia dla tego typu obciążenia wynosi 90° [119].



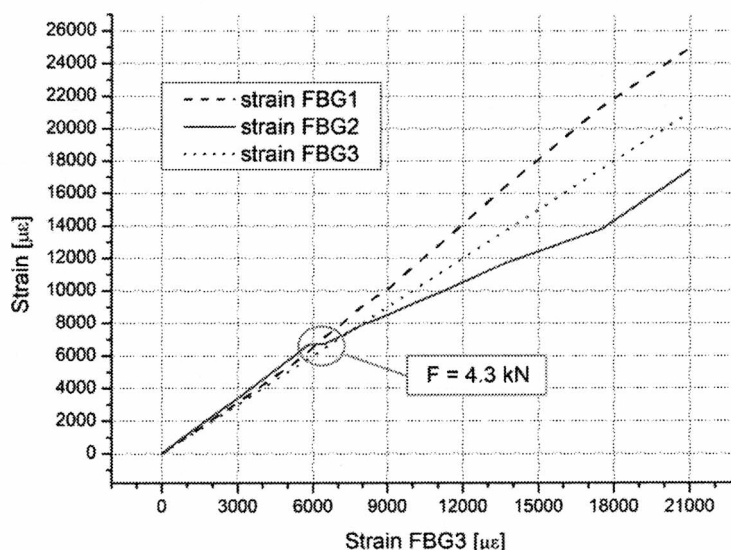
Rys. 4.4. Zestawienie wartości średnich odkształceń dla trzech rodzajów próbek kompozytowych: 30° , 45° i 60° w funkcji obciążenia.

4.2.2 Analiza makroskopowa rurowych próbek wykonanych metodą wyplatania

Badane próbki w skali makroskopowej można traktować jako próbki wykonane z materiału jednorodnego. Ponadto zakładając, że ciśnienie wewnętrzne (spowodowane ścisaniem 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 niejednorodności materiału. Porównanie zależności pomiędzy ciśnieniem wewnętrznym a odkształceniem, rejestrowanymi w różnych miejscach próbki (przez różne czujniki FBG), umożliwia określenie miejsca i chwili pojawienia się defektu. W chwili gdy w materiale pojawi się defekt (np. ścięcie na granicy faz), wówczas zależność pomiędzy odkształceniami mierzonymi w różnych punktach zostaje zaburzona.

Na rys. Rys. 4.5 przedstawione 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, analizując wykres przedstawiony na Rys. 4.2a, odpowiada sile ściskającej elastomer $F = 4,3 \text{ kN}$) charakterystyki są zbieżne i mają charakter liniowy. Powyżej wspomnianej wartości, zmienia się współczynnik kierunkowy prostej, a tym samym zależność odkształceń rejestrowanych przez FBG2 w funkcji sygnałów FBG3. 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 Rys. 4.3b

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. 4.5. Analiza porównawcza odkształceń obwodowych próbki o strukturze 30°.

4.2.3 Podsumowanie badań wyplatanych próbek rurowych

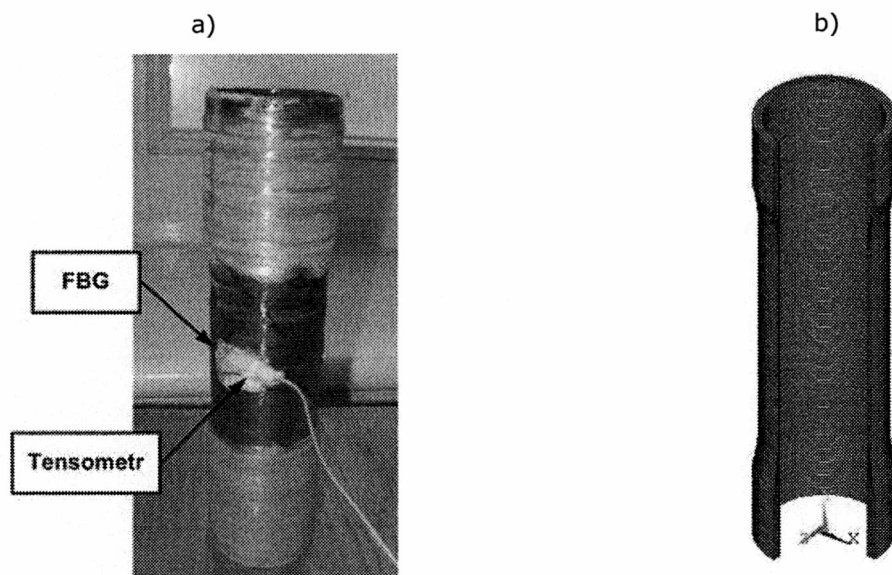
Uzyskane wyniki pomiarowe potwierdzają, iż czujniki światłowodowe mogą być z powodzeniem stosowane do pomiaru odkształceń kompozytowych elementów wykonanych metodą splatania. Pozwalają one na lokalny pomiar odkształceń z dokładnością na poziomie $\sim 1 \mu\epsilon$, w szerokim zakresie pomiarowym. Dzięki zastosowaniu światłowodowej techniki pomiarowej możliwe jest wyznaczenie dla próbek o kącie nawoju 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 obciążeń wywołanych działaniem ciśnienia wewnętrznego. 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 [119].

4.3 Badania próbek rurowych wykonanych metodą nawijania

4.3.1 Wyniki badań statycznych

Obiektami badań eksperymentalnych i numerycznych były kompozytowe próbki rurowe wykonane metodą nawijania włókna długiego, o takiej samej geometrii jak opisywane powyżej próbki wykonane metodą wyplotu (przedstawionymi powyżej na Rys. 4.1a). Próbki testowe wykonane zostały z nawiniętego obwodowo włókna węglowego w osnowie z żywicy epoksydowej (dwie warstwy włókna węglowego). Ponadto na próbkach wykonane zostały również wzmocnienia (zgodnie z Rys. 4.1a), które zapobiegały występowaniu złomu poza obszarem pomiarowym. Próbki poddawane były obciążeniu ciśnieniem wewnętrznym hydrostatycznym, zadawanym przy użyciu krążków gumowych, obciążanych tłoczyskami pulsatora hydraulicznego (opisywany powyżej sposób III, pozwalający uzyskać praktycznie jednoosiowy stan naprężenia – tylko naprężenia obwodowe).

W trakcie procesu nawijania próbek, wraz z ostatnią warstwą kompozytu, nawinięty został światłowód wielomodowy, stanowiący głowicę pomiarową czujnika amplitudowego [73]. Ponadto na próbce zainstalowane zostały: tensometr oporowy (jako czujnik odniesienia) oraz czujnik FBG, które rejestrowały odkształcenia obwodowe badanych próbek. Obydwa czujnik były naklejone na zewnętrznej powierzchni próbki, po jej przeciwnych stronach. Ciągłe monitorowanie, podczas statycznego obciążania próbek do zniszczenia, pozwoliło na weryfikację prowadzonych symulacji numerycznych [122]. Widok próbki przygotowanej do badań oraz jej model numeryczny przedstawiony został na Rys. 4.6.

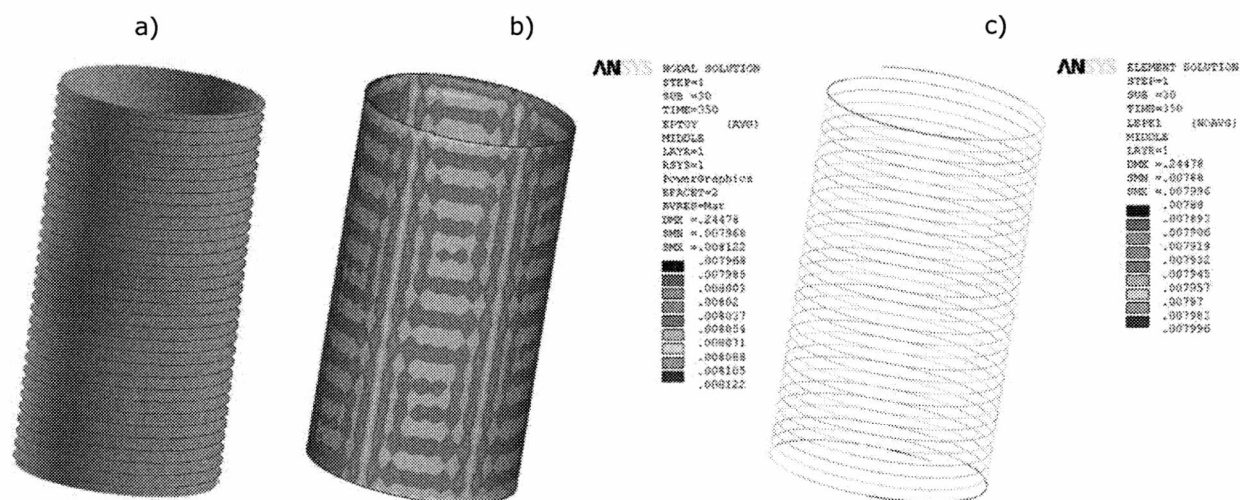


Rys. 4.6. Kompozytowa próbka rurowa przygotowana do badań (a) oraz jej model numeryczny (b).

4.3.2 Symulacje numeryczne nawijanej próbki rurowej

Próbka kompozytowa zamodelowana została przy użyciu warstwowych elementów powierzchniowych, natomiast do dyskretyzacji głowicy pomiarowej wykorzystane zostały elementy belkowe. Model dyskretny (Rys. 4.7a) ograniczony został tylko do obszaru pomiarowego próbki. W elementach powierzchniowych wyróżnione zostały dwie warstwy nawoju (kąt nawoju 0°) o grubości 0,5 mm każda, co odpowiadało ułożeniu warstw w obiekcie rzeczywistym. Interakcja między powierzchnią próbki kompozytowej, a światłowodem zamodelowana została przy użyciu elementów kontaktowych. Warunki kontaktu przyjęte zostały w ten sposób, aby nie dopuścić do poślizgu światłowodu na powierzchni próbki (ponieważ technologia łączenia głowicy pomiarowej z próbką wykluczała taką możliwość). Warunki brzegowe oraz obciążenie zostały dobrane tak, aby zasymulować próbę przeprowadzoną na maszynie wytrzymałościowej MTS. Próbka poddana została działaniu ciśnienia wewnętrznego, które zwiększano równomiernie od wartości 0 MPa do 50 MPa [122].

Podczas analizy rejestrowane były odkształcenia obwodowe w próbce kompozytowej (Rys. 4.7b) oraz odkształcenia wzdłużne w głowicy pomiarowej (Rys. 4.7c), powstałe w wyniku odkształcania się próbki. Początkowa długość światłowodu, nawiniętego ze skokiem 2,5 mm na obszar pomiarowy próbki, wynosiła 4008 mm. W wyniku działania ciśnienia wewnętrznego na próbkę kompozytową długość głowicy pomiarowej zwiększyła się o około 29 mm przy ciśnieniu 45,5 MPa, tak więc całkowite odkształcenie głowicy pomiarowej wyniosło 0,725 % [122].

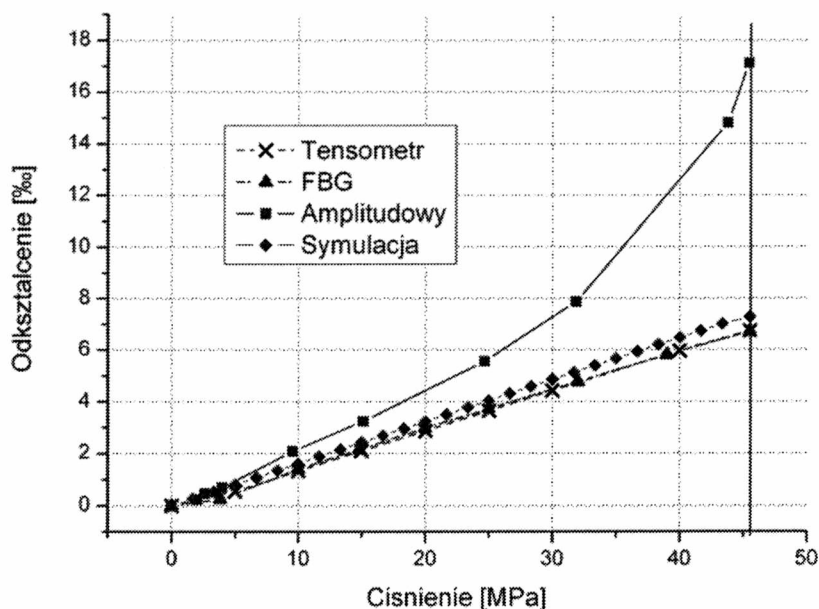


Rys. 4.7. Symulacje numeryczne kompozytowej próbki rurowej ze zintegrowanym światłowodowym czujnikiem amplitudowym:

- a) model dyskretny: kolor niebieski próbka kompozytowa, kolor czerwony głowica pomiarowa,
- b) rozkład odkształcenia obwodowego w próbce kompozytowej,
- c) rozkład odkształcenia wzdłużnego w głowicy pomiarowej.

4.3.3 Porównanie wyników eksperymentalnych i symulacyjnych

Na przedstawionym poniżej wykresie (Rys. 4.8) porównano wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonej analizy MES oraz na podstawie pomiarów wykonanych trzema metodami (tensometryczna, światłowodowa amplitudowa oraz światłowodowa z użyciem siatek Bragga). Zauważyć można korelację wyników uzyskanych z symulacji numerycznych, metody tensometrycznej i optycznej opartej na siatkach Bragga. Wyniki dla wymienionych metod pomiarowych są praktycznie identyczne, obie metody opierają się na pomiarze punktowym. Dodatkowym potwierdzeniem słuszności uzyskanych wyników są nieznacznie wyższe rezultaty uzyskane podczas symulacji z wykorzystaniem właściwości materiałowych, tożsamy z właściwościami materiałowymi badanych próbek. Różnice, które występują wywodzą się z różnic pomiędzy idealnym materiałem użytym w symulacji, a rzeczywistym materiałem obiektu. Wartości wyznaczone ze spadku mocy optycznej w metodzie amplitudowej odbiegają od wartości wyznaczonych pozostałymi sposobami. Dodatkowo wyliczona ze spadku mocy optycznej zależność odkształcenia w funkcji ciśnienia przyjmuje nieliniową postać. Nieliniowość ta jest najprawdopodobniej spowodowana mikrougięciami czujnika na niegładkiej powierzchni mierzonej próbki, co w rezultacie powodowałoby dodatkowe straty mocy optycznej (wypromieniowanej poza rdzeń światłowodu).



Rys. 4.8. Wykres zależności odkształcenia w funkcji ciśnienia dla różnych rodzajów czujników oraz symulacji numerycznej badanej próbki kompozytowej.

Odkształcenie światłowodu z symulacji wynosi 0,725%, a wyznaczone z pomiaru spadku mocy optycznej ok. 1,7%. Wartość ta została wyznaczona na podstawie badań nad zmianami mocy optycznej w światłowodzie obciążonymi siłą rozciągającą bez dodat-

kowego wpływu kontaktu głowicy pomiarowej z monitorowanym obiektem (opisane szerzej w pracy [73]). Moment zniszczenia próbki oznaczony został pionową linią na wykresie.

4.3.4 Podsumowanie badań nawijanych próbek rurowych

Zastosowanie systemu monitorowania opartego zarówno na klasycznych pomiarach tensometrycznych jak i metodzie optycznej wykorzystującej siatki Bragga pozwala na ciągłą kontrolę miejscowego stanu odkształcenia. Metody te pozwalają również zaobserwować moment pęknięcia próbki, jednakże trzeba brać pod uwagę wpływ odległości czujnik - złom. Metoda pomiarowa bazująca na światłowodowych czujnikach amplitudowych, pozwala jedynie na jakościowe szacowanie odkształceń monitorowanego obiektu. Jednakże jej główną zaletą (poza niskimi kosztami czujników i urządzeń pomiarowych) jest możliwość monitorowania całego obiektu, co w efekcie daje gwarancje wystąpienia złomu w monitorowanym obszarze.

Przy wykorzystaniu obu omawianych systemów optycznych, lub metody tensometrycznej i optycznej amplitudowej, można uzyskać system kompleksowo monitorujący stan odkształcenia próbki i moment jej zniszczenia.

4.4 Badania próbek kompozytowych z programowanymi defektami

Punktowa deformacja warstwy kompozytowej powoduje wzrost lokalnych naprężeń w obwodowo nawiniętej strukturze oraz modulację fali świetlnej propagowanej w głowicach pomiarowych. Przeprowadzone badania miały na celu wyznaczenie odpowiedzi czujników na lokalne odkształcenia materiału kompozytowego oraz dobór odległości pomiędzy nimi, zapewniający możliwość rejestracji powstałego defektu.

Wykonano badania eksperymentalne na długowłóknistym kompozytowym obiekcie cylindrycznym, mające na celu weryfikację skuteczności optycznego systemu monitorowania makroskopowego defektu, powstającego w skutek koncentracji uszkodzeń w warstwie kompozytowej. Przebadano obiekt o obwodowym zbrojeniu węglowym w epoksydowej osnowie. Ustalono czułość optycznego systemu monitorowania dla przebadanej geometrii nawoju i skonfrontowano wyniki z numeryczną symulacją odwzorowującą wykonany eksperyment [123]. Ponadto przeprowadzone zostały symulacje numeryczne badanego obiektu, które miały na celu sprawdzenie poprawności uzyskanych wyników pomiarowych oraz wyznaczenie odpowiedzi czujników na deformacje przy innych kątach nawoju kompozytu.

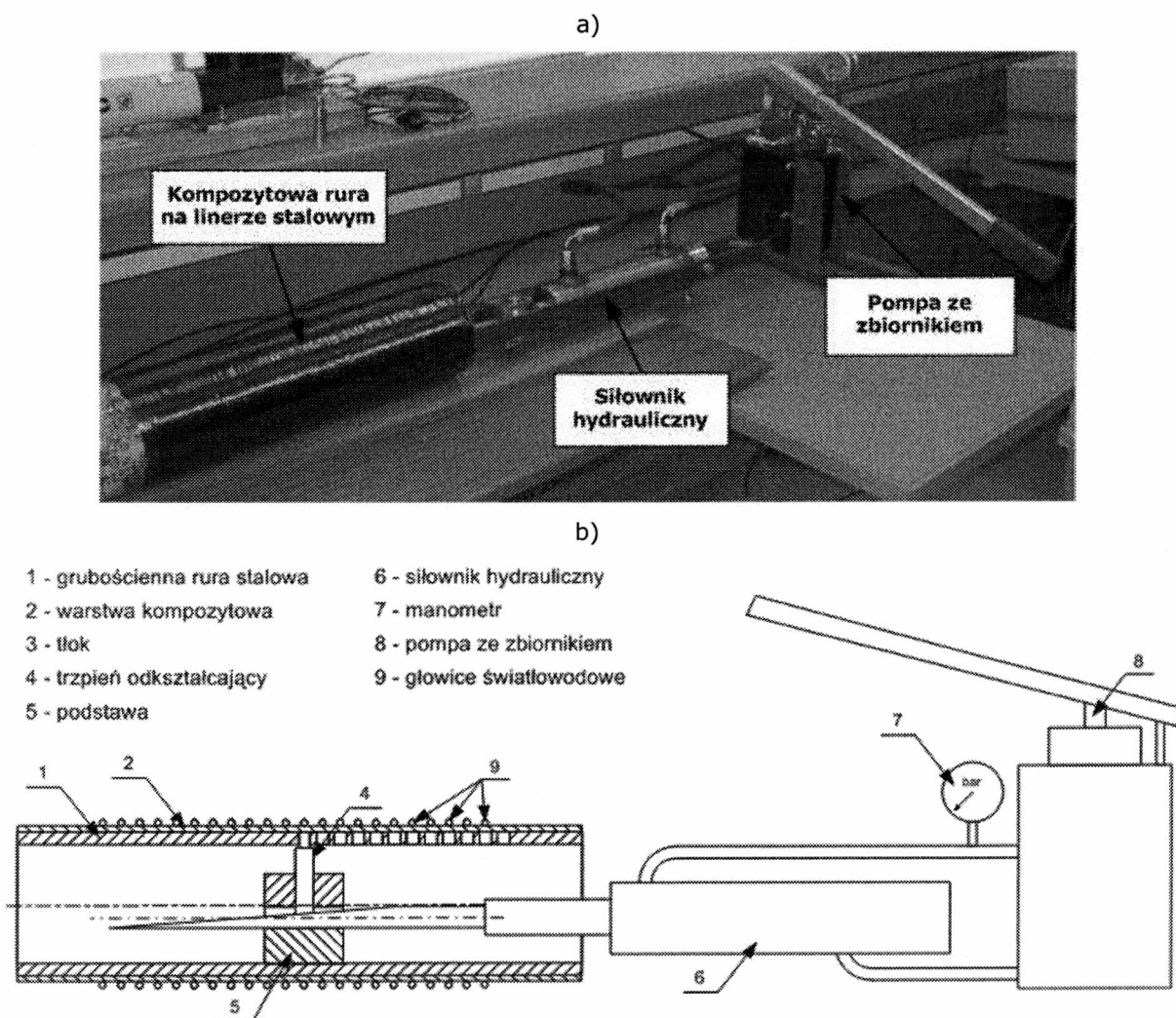
Wstępne prace doświadczalne, związane z pomiarami stanu wyężenia powłok kompozytowych za pomocą czujników światłowodowych, przeprowadzono dla testowego układu składającego się ze stalowej rury (o średnicy zewnętrznej $\phi=120$ mm z nawierconymi

otworami do zadawania deformacji), na której powierzchni zewnętrznej nawinięto warstwę węglowego materiału kompozytowego (Rys. 3.7a). Z badaną warstwą kompozytową zintegrowano siatki Bragga (w kolejności FGB4, FGB2, FBG3) pełniące rolę czujników odkształceń. Czujniki oznaczone numerami 3 i 4 były oddalone od siebie o około 25 mm. W bezpośrednim sąsiedztwie FBG3 znajdowała się mikrougięciowa głowica światłowodowa [5].

4.4.1 Opis przeprowadzonych badań

W celu realizacji badań mających na celu określenie maksymalnych odległości pomiędzy czujnikiem a punktowym defektem w materiale kompozytowym, skonstruowano stanowisko, którego schemat przedstawiono na rysunku powyżej (Rys. 3.7b) Składa się ono z dwóch podzespołów:

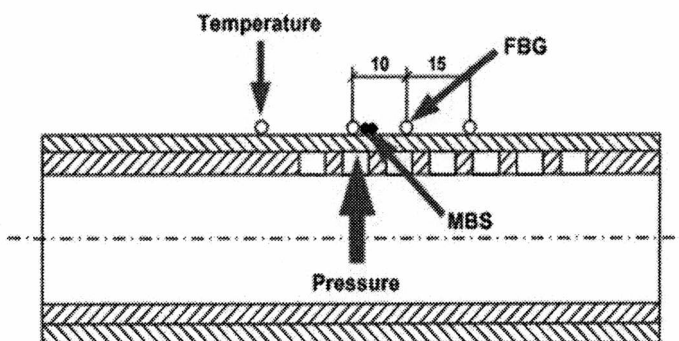
- stalowej rury z nawiniętym materiałem kompozytowym,
- układu hydraulicznego – do wymuszania odkształceń warstwy kompozytowej.



Rys. 4.9. Stanowisko do symulacji defektów w rurze kompozytowej (a) oraz jego schemat (b).

Grubościenną stalową rurę (Rys. 3.7 - 1), pokrytą warstwą długowłóknistego kompozytu węglowo-epoksydowego (2), nawiniętego obwodowo. W rurze wykonano szereg otworów, przez które możliwe było odkształcanie badanej warstwy materiału kompozytowego. Poruszający się dzięki siłownikowi hydraulicznemu (6) trzpień (4) oddziaływał na warstwę kompozytową, powodując jej deformację. Siłę, z jaką trzpień oddziaływał na warstwę kompozytową, kontrolowano mierząc wartość ciśnienia w siłowniku przy użyciu manometru (7).

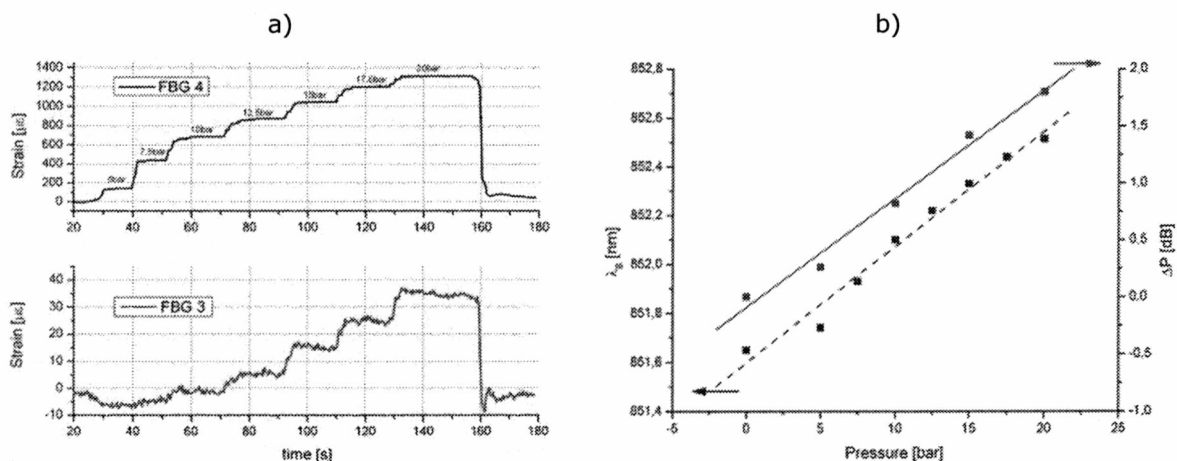
Z badaną warstwą kompozytową zintegrowano światłowodowe siatki Bragga (Rys. 4.10; w kolejności od lewej strony: FGB4, FGB2, FBG3) pełniące rolę czujników odkształceń. Czujniki oznaczone numerami 3 i 4 były oddalone od siebie o około 25 mm. Dodatkowy czujnik FBG służył do kompensacji wpływu zmian temperatury na przeprowadzane pomiary odkształceń. Dodatkowo zastosowano nowatorską głowicę mikrougięciową, która umieszczona została dokładnie nad miejscem przyłożenia siły wymuszającej odkształcenie kompozytu (w bezpośrednim sąsiedztwie czujnika FBG3). Długość obszaru pomiarowego głowicy mikrougięciowej wynosiła 100 mm, natomiast jej liczba spleci była rzędu 200/m [32].



Rys. 4.10. Rozmieszczenie czujników światłowodowych na powierzchni zewnętrznej próbki rurowej.

4.4.2 Wyniki eksperymentalne

Na rysunku Rys. 4.11 przedstawione zostały uzyskane wyniki badań, pokazujące zmiany odkształceń rejestrowane przez siatki Bragga FBG3 oraz FBG4 oraz amplitudy sygnału w czujniku mikrougięciowym. Analiza wykresów pozwala zauważyć, iż wraz ze wzrostem ciśnienia wymuszanego przy pomocy siłownika, czyli wraz ze wzrostem siły oddziałującej na warstwę kompozytową, liniowo wzrasta jej odkształcenie oraz równocześnie zwiększa się moc optyczna propagowana w głowicy mikrougięciowej (Rys. 4.11b). Wzrost mocy jest pozorny, gdyż w rzeczywistości zmniejsza się tłumienie głowicy. Spowodowane jest to zmniejszeniem się promienia krzywizny ugięcia włókna światłowodowego w głowicy, wynikające z jej wydłużenia.



Rys. 4.11. Równoległe pomiary odkształceń przy pomocy FBG4 i FBG3 w różnych punktach obiektu (a) oraz zmiany mocy optycznej (rejestrowane przez mikrougięciową głowicę światłowodową) i długości fali Bragga (rejestrowane przez FBG4) w funkcji zmian ciśnienia (b).

Należy zwrócić uwagę, iż odkształcenia mierzone przez czujnik FBG3 są znacznie mniejsze niż przez czujnik FBG4, w pobliżu którego wymuszano deformacje. Oznacza to, iż dla monitorowania konstrukcji o dużych wymiarach konieczne jest właściwe zlokalizowanie siatek Bragga traktowanych jako punktowe głowice pomiarowe.

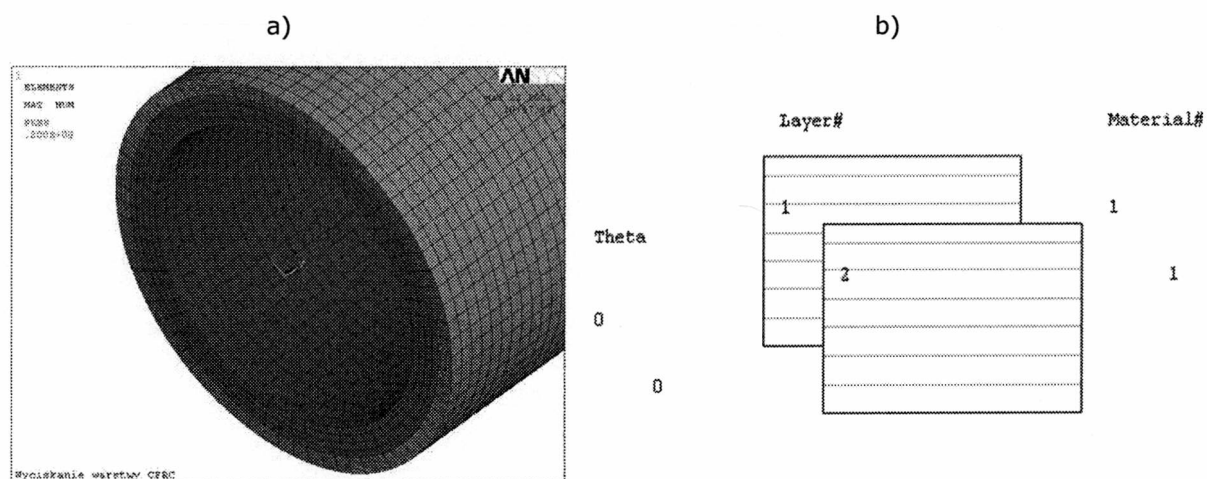
Zwiększenie czułości czujników mikrougięciowych (oznaczane również jako dynamika pomiaru) możliwe jest do osiągnięcia przy zastosowaniu głowic pomiarowych o zoptymalizowanych parametrach [124]. Przeprowadzone niezależnie od omawianych eksperymentów badania czujników mikrougięciowych dowodzą, iż w celu poprawy dynamiki zmian sygnału optycznego należy stosować głowice, dla których ilość skręceń światłowodu na jednostkę długości włókna jest większa.

4.4.3 Wyniki symulacji numerycznych

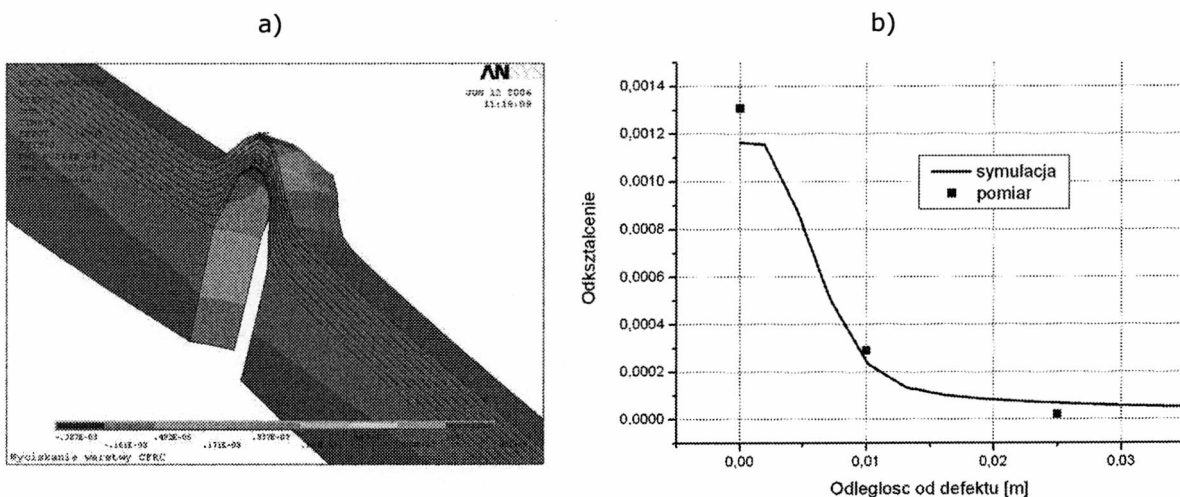
Dla opisanego wyżej doświadczenia przeprowadzono analizę teoretyczną odkształceń z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych. Celem przeprowadzonego modelowania było zbadanie odpowiedzi materiału kompozytowego na quasi punktowe obciążenie wewnętrzne. Wymiary geometryczne wszystkich elementów symulowanego układu badawczego były tożsame z wykorzystanym do badań układem rzeczywistym. Wykorzystane dane materiałowe pochodzą z wcześniejszych badań. Przy założeniu błędów wykonania obiektu, zarówno pod kątem nie idealnego ułożenia włókien, fluktuacji grubości poszczególnych warstw czy defektów materiałowych matrycy, założono tożsamość obiektu wirtualnego i rzeczywistego. Widok zamodelowanego obiektu pokazany jest na Rys. 4.12 [88].

Porównano rezultaty miejscowego odkształcenia obwodowego, co odpowiadało danym uzyskanym przy użyciu czujników FBG. Wyniki uzyskanych przy pomocy obydwu metod

oraz obraz odkształceń przy 500-krotnym powiększeniu zestawiono na Rys. 4.13. Uzyskane z symulacji numerycznej wyniki zostały porównane z eksperymentalnymi. Różnica pomiędzy nimi wynosiła maksymalnie około 10% [88]. Jest ona wynikiem rozbieżności pomiędzy obiektem rzeczywistym, a jego modelem numerycznym. Przyjęty model zakładał, że włókna wzmocnienia ułożone są pod kątem 90° , natomiast ze względów technologicznych w przygotowanej próbce kąt ten był nieznacznie mniejszy (około 88°).



Rys. 4.12. Widok geometrii obiektu oraz ułożenia poszczególnych materiałów; warstwy stalowa i kompozytowa (a), przykład ułożenia włókien (b).



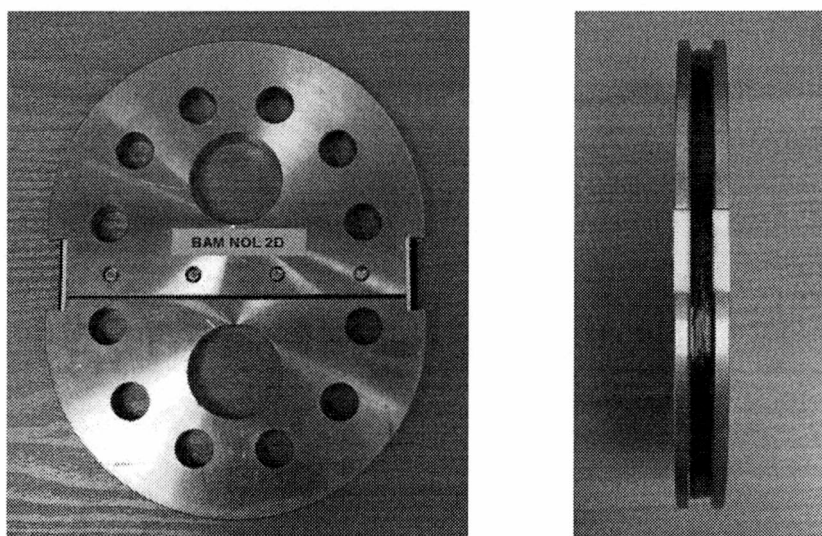
Rys. 4.13. Rozkład odkształceń w kierunku obwodowym przy quasi-punktowym obciążeniu - rozważania teoretyczne (a) oraz porównanie odkształceń testowej warstwy kompozytowej określonych eksperymentalnie i w wyniku modelowania (b).

4.5 Badania próbek typu NOL

4.5.1 Opis próbek i badania wstępne

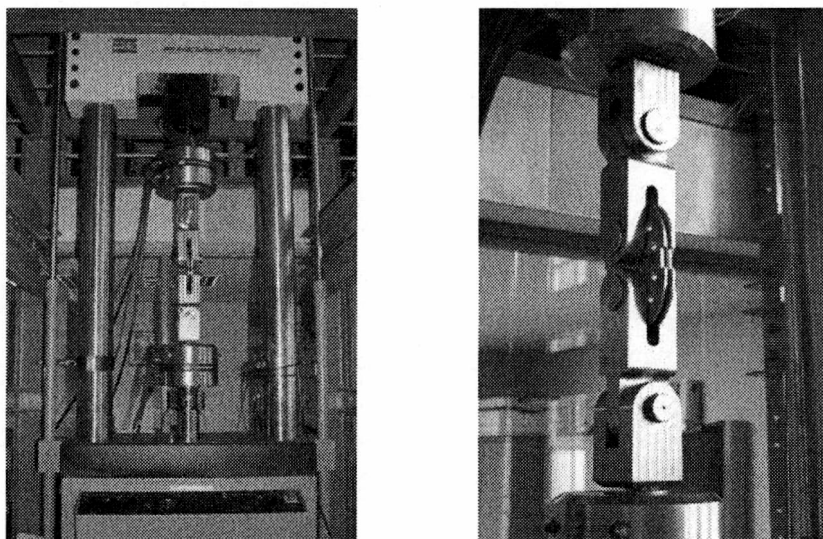
Próbki kompozytowe typu NOL zostały wyprodukowane we współpracy z firmą Xperion oraz niemieckim federalnym instytutem badawczym: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Do ich wytworzenia wykorzystano materiał identyczny z materiałem stosowanym na zbiorniki wysokociśnieniowe (włókno węglowe + żywica epoksydowa) produkowane przez firmę Xperion. Widok próbki nawiniętej bezpośrednio na uchwycie testowym przedstawiono na Rys. 4.14. Geometria uchwytów oraz grubość warstwy kompozytowej została opracowana na potrzeby projektu InGAS przez BAM.

W ramach procesu produkcyjnego przygotowano 12 jednakowych próbek. Wymiar przekroju testowego próbek wynosił: 6.9 mm x 2.9 mm, zatem rozmiar testowego pola przekroju wynosił $\sim 0.00004 \text{ m}^2$ (liczony jako suma dwóch przekrojów).



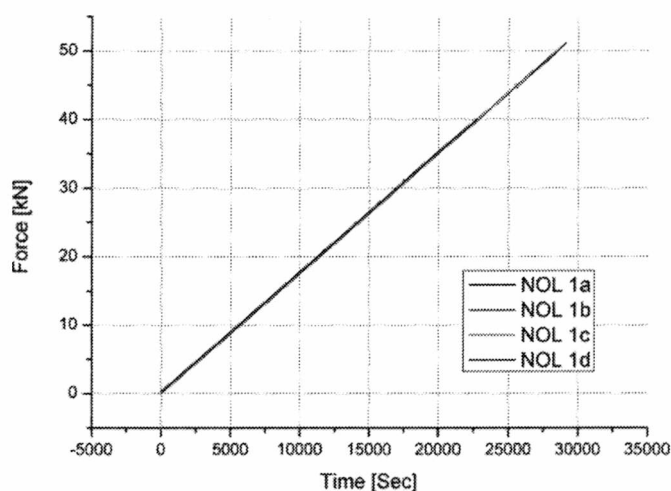
Rys. 4.14. Widok kompozytowej próbki typu NOL nawiniętej na uchwycie testowym.

W celu wyznaczenia maksymalnej wytrzymałości próbek przeprowadzona została seria prób na rozciąganie (ang.: Tensile test) z wykorzystaniem pulsatora hydraulicznego MTS. Badania przeprowadzono dla trzech różnych prędkości narostu siły rozciągającej: 175 N/s, 17,5 N/s oraz 1,75 N/s, co odpowiadało zmianom naprężeń kompozytowej warstwy nośnej w zbiorniku ciśnieniowym, który poddany był próbie na rozrywanie ciśnieniem wewnętrznym (ang.: Hydrostatic burst test) z prędkościami odpowiednio: 100 bar/min, 10 bar/min oraz 1 bar/min. Ciśnienie rozrywania dla porównawczych zbiorników wynosiło ok. 500 bar. Widok stanowiska testowego wraz z zainstalowaną próbką przedstawiono na poniżej na Rys. 4.15.

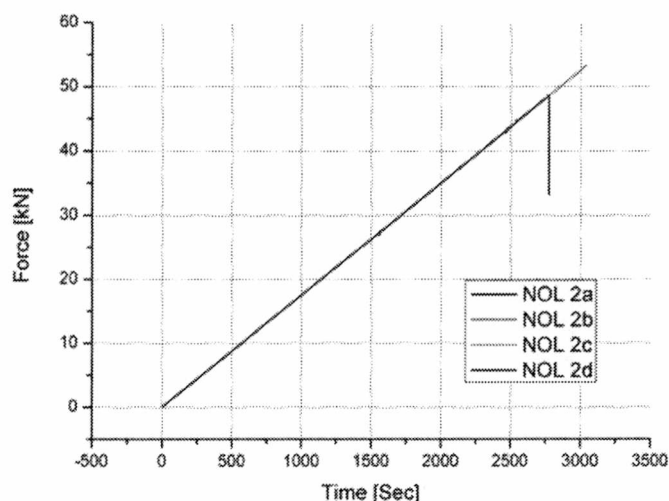


Rys. 4.15. Widok stanowiska do badania próbek typu NOL oraz widok próbki zamocowanej w uchwytach.

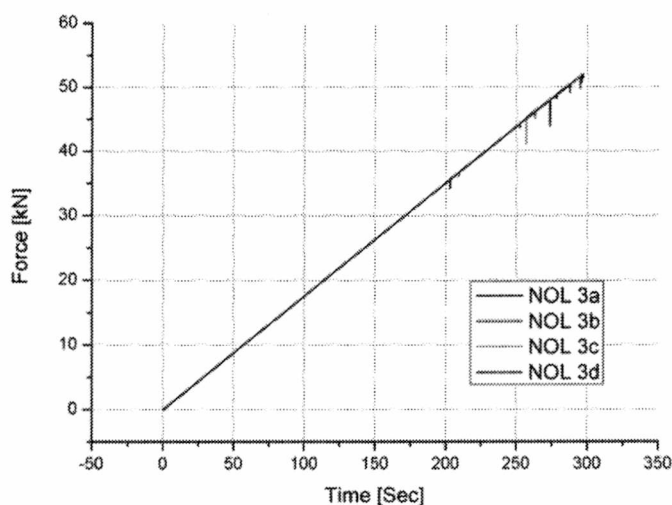
Wykresy przedstawiające zmianę obciążenia próbki w czasie przedstawiono na rysunkach poniżej (Rys. 4.16 ÷ Rys. 4.18). Zastosowanie procedury sterowania siłą maszyny wytrzymałościowej umożliwiło uzyskanie zamierzonych i stabilnych prędkości obciążania próbek. Na Rys. 4.17 oraz Rys. 4.18 zauważyć można, że w trakcie badań dla niektórych próbek zarejestrowano uskoki w przebiegu wartości sił. Zdarzenia te związane były z układaniem się materiału kompozytowego w próbce (lokalne pęknięcia żywicy oraz wzmocnienia, odspojenia się ostatniej warstwy wzmocnienia - Rys. 4.20a) w trakcie przyrostu obciążenia.



Rys. 4.16. Przyrost siły w funkcji czasu trwania eksperymentu (1.75 N/s).



Rys. 4.17. Przyrost siły w funkcji czasu trwania eksperymentu (17.5 N/s).



Rys. 4.18. Przyrost siły w funkcji czasu trwania eksperymentu (175 N/s).

4.5.2 Wyniki badań wstępnych

Wyniki z przeprowadzonych badań zestawiono w tabeli (Tab. 4.1). W trakcie eksperymentu rejestrowana była siła (w tym także siła maksymalna przy rozerwaniu) oraz przemieszczenie tłoka maszyny wytrzymałościowej. Należy zauważyć, iż różnice w wartościach maksymalnych sił w momencie rozerwania dla najwyższych prędkości obciążania są najmniejsze (najmniejsza wartość odchylenia standardowego SD). Wraz ze spadkiem prędkości narostu obciążenia wzrasta rozrzut mierzonych sił maksymalnych. Największa wartość parametru SD występuje dla prędkości obciążania 1.75 N/s. Ponadto znacząco zmniejsza się wartość średnich sił rozrywających. Różnica pomiędzy siłami maksymalnymi dla poszczególnych próbek NOL1 wynosi ponad 11 kN, co stanowi ok. 21% wartości maksymalnej. Wynika to z różnic w prędkościach rozwoju defektów w materiale kompo-

zytowym. Wzrost prędkości obciążania powoduje, iż prędkość rozwoju defektów jest mniejsza, co skutkuje mniejszymi rozrzutami w wartościach sił rozrywających.

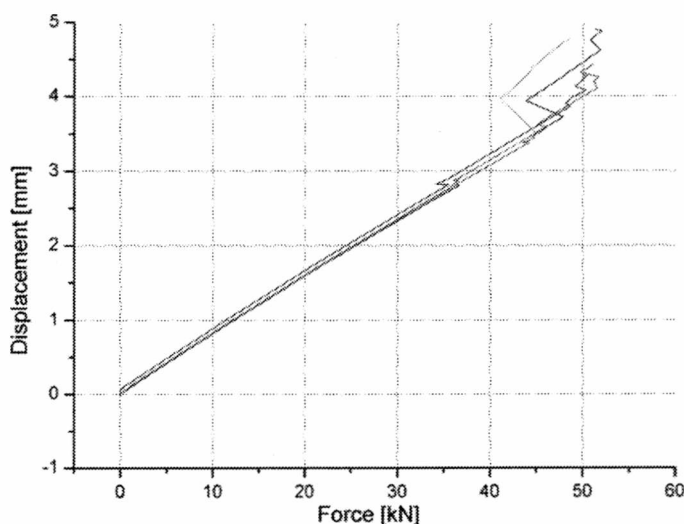
Tab. 4.1. Tabela wyników próby na rozciąganie dla próbek NOL

	F_{max} [kN]				F_{średnia} [kN]	SD [kN]	σ [GPa]
	A	B	C	D			
NOL 1 - 1.75 N/s	49.87	51.30	46.73	40.03	46.98	4.34	1.19
NOL 2 - 17.5 N/s	53.21	49.09	53.15	48.69	51.04	2.15	1.30
NOL 3 -175 N/s	51.98	51.66	48.54	50.39	50.64	1.35	1.29

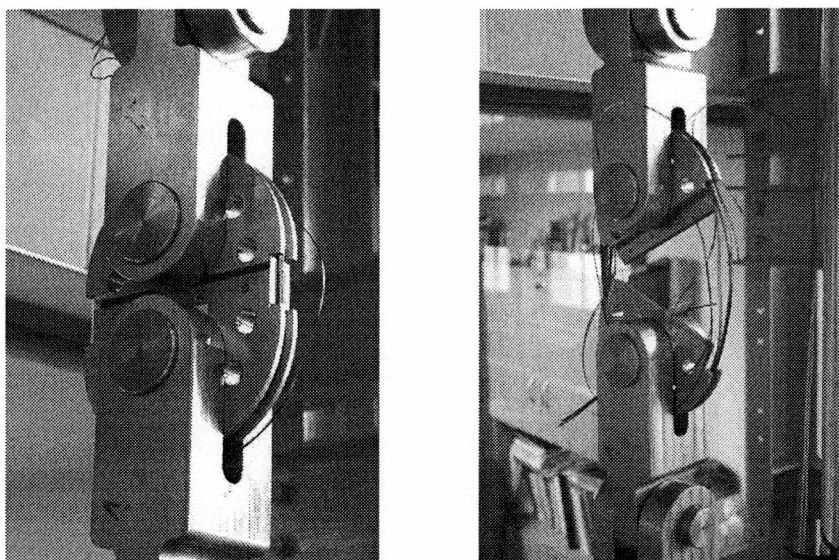
SD – odchylenie standardowe, σ – napężenie w przekroju próbki

W trakcie każdej z przeprowadzonych prób zaobserwowano, że w trakcie obciążania próbki pierwsze odrywało się ostatnie pasmo wzmocnienia kompozytowego (Rys. 4.20). W zależności od prędkości obciążania zdarzenie to występowało w zakresie sił od 20 do 35 kN i było najbardziej powtarzalne dla najwyższych prędkości obciążania (ok. 35 kN). Ponadto powodowało gwałtowny skok na wykresie czas-przemieszczenie tłoka oraz siła-przemieszczenie tłoka. Przykładowy przebieg charakterystyki siła-przemieszczenie z widocznymi gwałtownymi zmianami, dla prędkości obciążania wynoszącej 175 N/s, przedstawiono na Rys. 4.19.

Do dalszych badań przyjęto, iż uśredniona wartość siły rozrywającej wynosi 49,55 kN i na jej podstawie przyjmowano progi obciążeń przy badaniach na pełzanie.



Rys. 4.19. Zmiana przemieszczenia tłoka maszyny wytrzymałościowej pod wpływem przyłożonej siły rozciągającej dla zmiany obciążenia z prędkością 175 N/s.

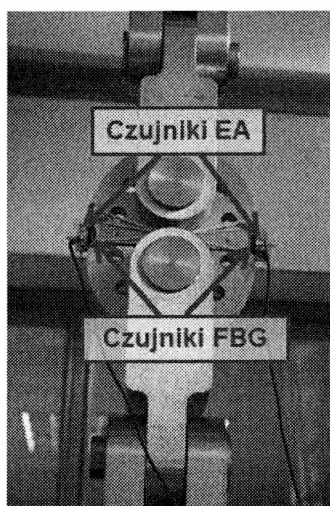


Rys. 4.20. Moment oderwania się ostatniego pasma wzmocnienia kompozytowego (a) oraz rozrywania (b) testowej próbki NOL.

4.5.3 Badania quasi-statyczne

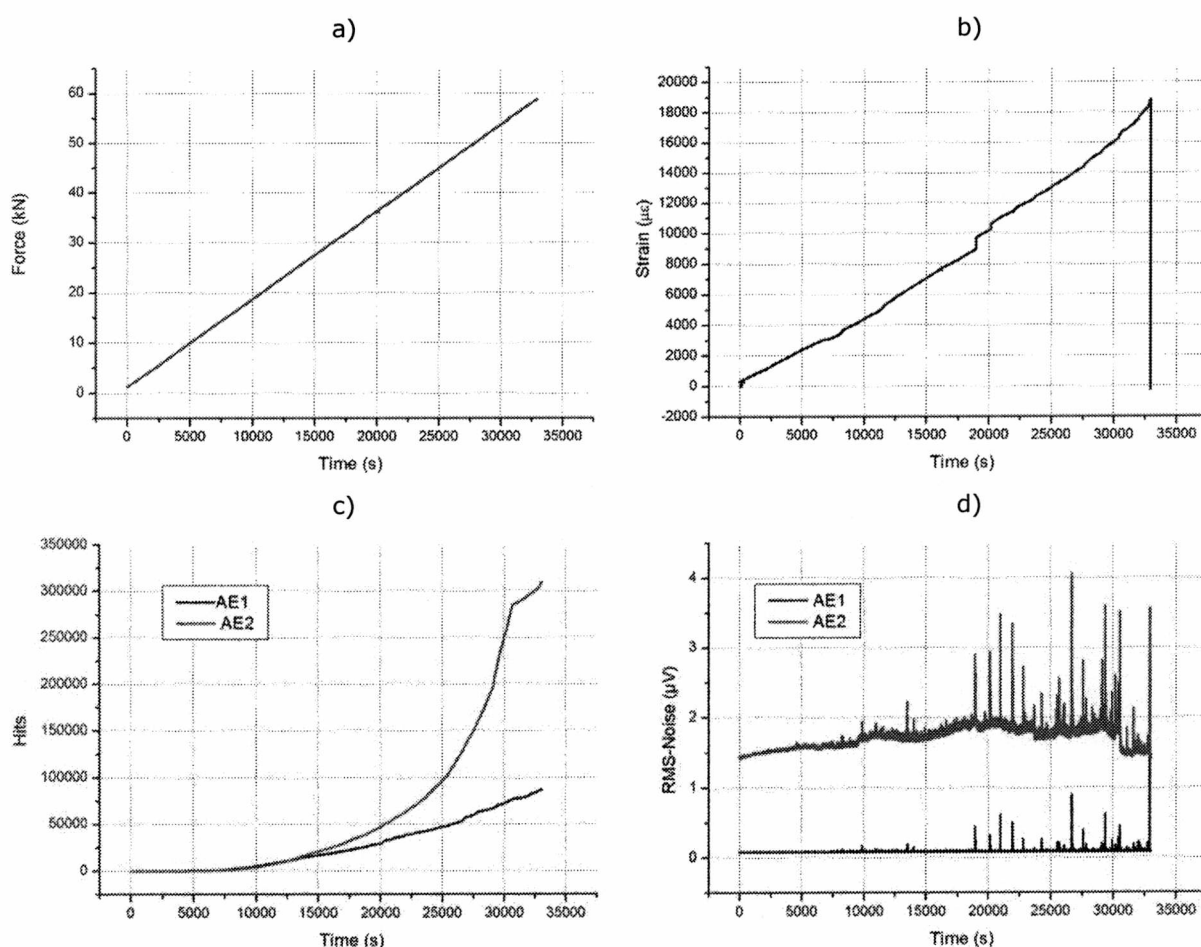
Po przeprowadzeniu prób na rozciąganie i oszacowaniu na ich podstawie wytrzymałości kompozytowych próbek NOL, z wykorzystaniem takich samych materiałów jak poprzednio oraz tych samych uchwytów badawczych, wykonana została kolejna seria próbek, które poddane zostały badaniom quasi-statycznym oraz pełzaniu,.

W trakcie próby quasi-statycznej próbki były obciążane ze stałą prędkością 1,75 N/s. W trakcie trwania eksperymentu rejestrowane było odkształcenie (na odcinku prostoliniowym próbki NOL przez dwa czujniki FBG, naklejone po dwóch stronach próbki), sygnały emisji akustycznej (poprzez dwa czujniki EA) oraz parametry maszyny wytrzymałościowej: siła i przemieszczenie. Rozmieszczenie czujników na próbce przedstawiono na Rys. 4.21.



Rys. 4.21. Lokalizacja czujników FBG oraz emisji akustycznej (EA) na próbce typu NOL.

Na Rys. 4.22 przedstawiono zmianę sygnałów rejestrowanych w trakcie trwania całego eksperymentu (ok. 9 godzin). Należy zauważyć, iż przyrost siły (Rys. 4.22a) miał charakter liniowy w całym mierzonym zakresie. Wynika to z faktu, iż proces rozciągania kontrolowany był, podobnie jak przy wcześniejszej próbie, poprzez pomiar siły przez maszynę wytrzymałościową. Umożliwiło to uzyskanie zamierzonej i stabilnej prędkości obciążania próbki (1,75 N/s). Na Rys. 4.22b przedstawiona została zmiana odkształceń zarejestrowana na prostoliniowym odcinku próbki NOL. Należy zauważyć, że zmiana ma charakter niemal liniowy, za wyjątkiem obszarów uskoków, gdzie następuje skokowy wzrost rejestrowanych wartości (np. w 18955 sekundzie trwania eksperymentu). Zjawisko to związane jest z powstaniem delaminacji w strukturze materiału kompozytowego. Ze względu na uszkodzenie jednego z czujników FBG, odkształcenia rejestrowane były tylko z jednej strony próbki.



Rys. 4.22. Badania quasi statyczne próbki typu NOL przy zmianie obciążania ze stałą prędkością 1,75 kN/s w funkcji czasu:

- a) przyrost siły rozciągającej (Force),
- b) zmiana odkształceń (Strain) zarejestrowana czujnikami FBG,
- c) przyrost liczby zdarzeń akustycznych (Hits) zarejestrowany przez czujniki EA,
- d) sygnał RMS-Noise zarejestrowany przez czujniki EA.

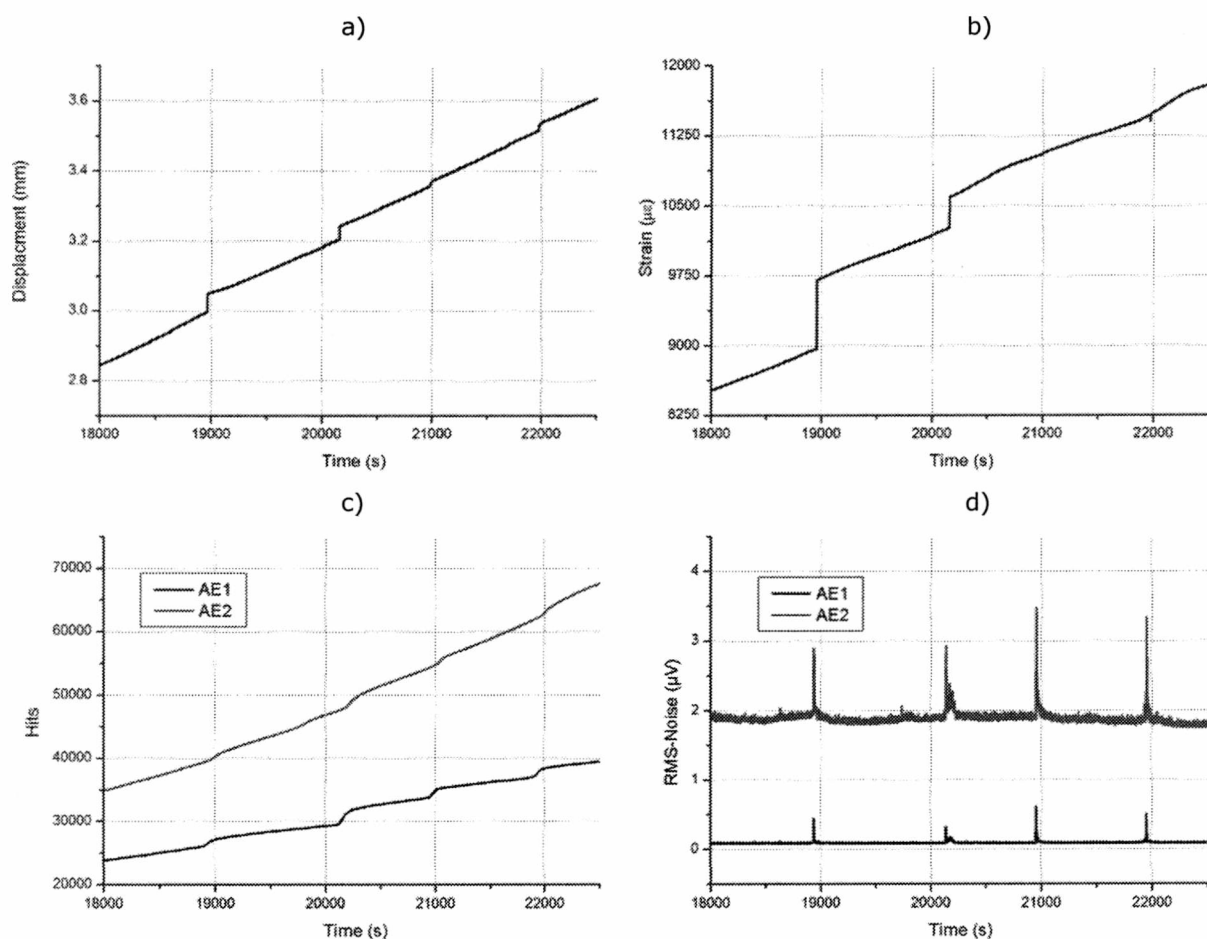
Na kolejnych dwóch wykresach (Rys. 4.22c i Rys. 4.22d) przedstawione zostały sygnały zarejestrowane przez czujniki emisji akustycznej. Na pierwszym ze wspomnianych wykresów widoczny jest wzrost całkowitej liczby zdarzeń akustycznych zarejestrowanych przez dwa czujniki EA (oznaczone na wykresie jako: AE1 oraz AE2). Można zauważyć, iż w początkowym okresie eksperymentu (do ok. 13000 sekundy) liczba zdarzeń była stosunkowo niewielka, miała podobny przebieg dla obydwu przetworników (po obu stronach próbki) oraz nie charakteryzowała się gwałtownymi zmianami. Natomiast po przekroczeniu wspomnianego czasu, zarejestrowano gwałtowny wzrost liczby zdarzeń akustycznych, ze szczególnym uwzględnieniem przetwornika oznaczonego AE2, dla którego zmiana sygnału do czasu ~ 30600 sekund miała charakter wykładniczy, a następnie, ze względu na zapoczątkowany proces delaminacji wzmocnienia w okolicy przetwornika, który spowodował przemieszczenie się czujnika na próbce (co potwierdza również analiza sygnału RMS-Noise w ostatnim czasie trwania eksperymentu), liniowy. Zmiany sygnałów akustycznych rejestrowanych przez drugi z przetworników EA (na wykresie ozn. AE1) były znacząco mniejsze w porównaniu do sygnałów zarejestrowanych przez pierwszy z omawianych przetworników, jednak były bardzo wyraźne.

Ostatni z przedstawionych wykresów (Rys. 4.22d) przedstawia zmiany sygnału RMS-Noise, czyli porównanie wartości skutecznej sygnału EA do rejestrowanego widma szumów. Pozwala to na uwydatnienie z całego widma sygnałów emisji akustycznej, impulsów pochodzących z gwałtownego uwolnienia energii EA w postaci fal sprężystych [125], czyli inaczej mówiąc impulsów pochodzących od gwałtownych, lokalnych defektów związanych z pękaniem struktury kompozytowej (np. przerwanie ciągłości włókna i jego relaksacja w matrycy).

Na wykresach przedstawionych na Rys. 4.23 pokazany został, z badań opisywanych powyżej, wybrany przedział czasu, w którym zarejestrowano gwałtowny wzrost defektów w strukturze materiału kompozytowego, co skutkowało znaczącymi zmianami mierzonych sygnałów pochodzących z emisji akustycznej oraz odkształceń. Powstanie defektów (zerwania pojedynczych włókien węglowych oraz tzw. ścięcia na granicy faz włókno-żywica) spowodowało, iż na wykresie siła-czas (Rys. 4.23a) w wybranych chwilach pojawiły się nagłe zmiany w rejestrowanych wartościach sygnałów. W tych samych chwilach czasu na wykresie odkształceń (Rys. 4.23b) pojawiły się analogiczne gwałtowne zmiany, które dodatkowo potwierdzone zostały przez czujniki EA, rejestrujące zdarzenia akustyczne (Rys. 4.23c oraz Rys. 4.23d). Na pierwszym z rysunków można zauważyć wzrost całkowitej liczby zdarzeń akustycznych, natomiast na drugim w tożsamy sposób czasu, zauważyć należy charakterystyczne piki, pochodzące od nagłego uwolnienia energii EA. Jednakże nie wszystkie zarejestrowane zmiany sygnału RMS mają swoje odzwierciedlenie w pomiarach odkształceń. Związane jest to ze specyfiką pomiaru obydwoma metodami. Czujniki emisji akustycznej rejestrują wszystkie zdarzenia akustyczne powstałe

w całej objętości badanej próbki NOL, natomiast światłowodowe czujniki FBG w zaproponowanej konfiguracji, rejestrują jedynie odkształcenia w obszarze prostoliniowego odcinka uchwytu NOL.

Można zatem stwierdzić, że występuje korelacja pomiędzy zmianami pola odkształceń materiału kompozytowego, rejestrowanymi przez czujniki światłowodowe FBG, a zmianami sygnałów emisji akustycznej. Należy jednak wyraźnie podkreślić, iż w opisywanej aplikacji zastosowane czujniki FBG nie rejestrują w sposób bezpośredni emisji akustycznej, a jedynie zjawisko (wzrost defektów w strukturze) powodujące równoczesną zmianę stanu odkształcenia materiału kompozytowego oraz związaną z tym emisję akustyczną.



Rys. 4.23. Badania quasi statyczne próbki typu NOL przy zmianie obciążania ze stałą prędkością 1,75 kN/s w wybranym fragmencie czasu:

- a) przyrost siły rozciągającej (Force),
- b) zmiana odkształceń (Strain) zarejestrowana czujnikami FBG,
- c) przyrost liczby zdarzeń akustycznych (Hits) zarejestrowany przez czujniki EA,
- d) sygnał RMS-Noise zarejestrowany przez czujniki EA.

4.5.4 Badania na pełzanie

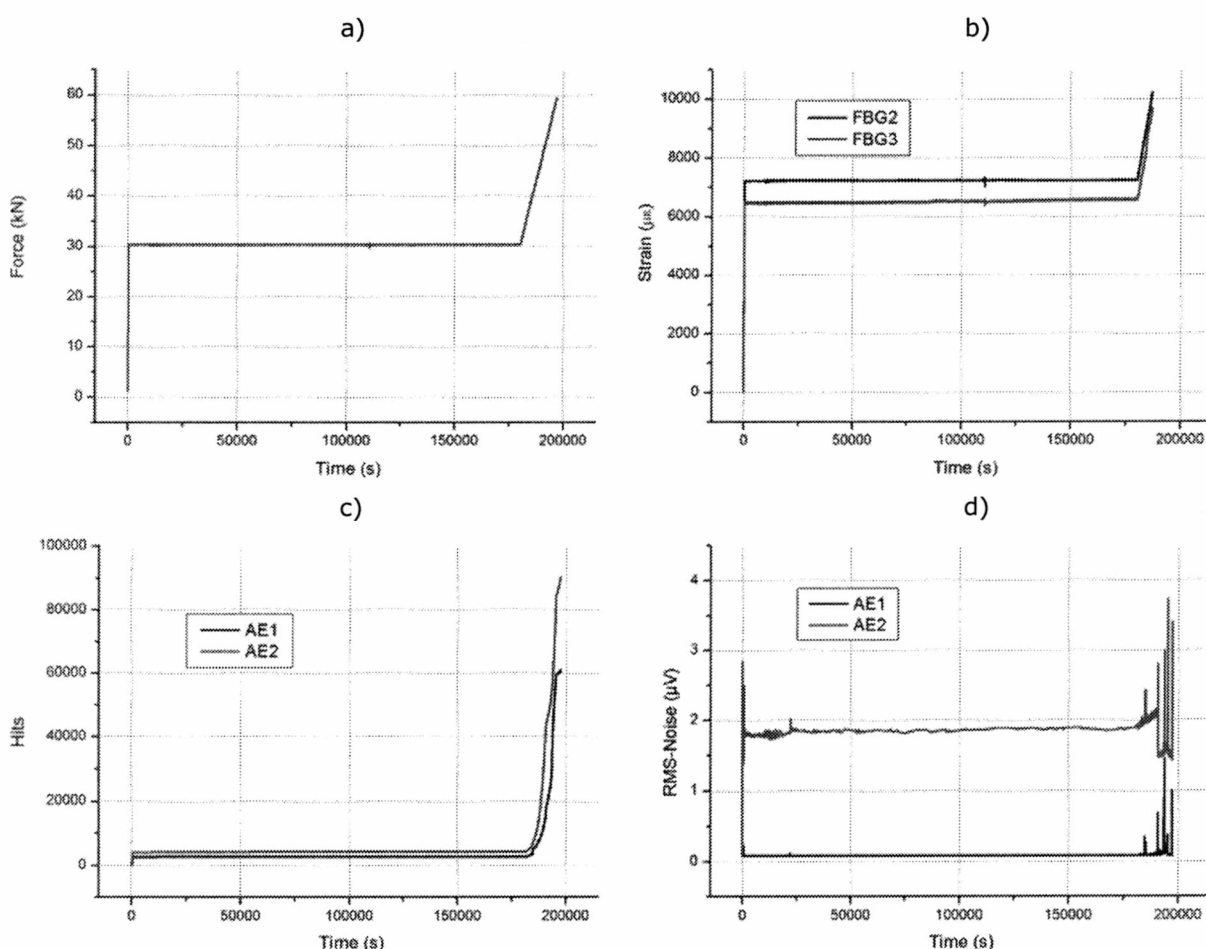
Analogiczne, jak opisywane powyżej pomiary i analizy, przeprowadzone zostały w trakcie badań próbek NOL na pełzanie (ang.: static fatigue), znajdujących się pod stałym obciążeniem. Na próbce, w sposób podobny jak przedstawiono to na wcześniej na Rys. 4.21, zainstalowane zostały czujniki odkształceń (FBG) oraz emisji akustycznej (EA). Celem niniejszych badań było sprawdzenie przydatności pomiarów odkształceń realizowanych metodami światłowodowymi, poprzez ich korelację z metodami emisji akustycznej, do oceny stanu długotrwałej degradacji materiału kompozytowego znajdującego się pod stałym obciążeniem, początkowo na próbkach, a docelowo także zbiornikach wysokociśnieniowych.

Badania na pełzanie zostały zrealizowane przy wykorzystaniu stanowiska opisywanego w punkcie 4.5.1 w dwóch seriach. W pierwszej z nich program sterujący całym procesem został skonfigurowany tak, aby w początkowej fazie eksperymentu wymusić przyrost obciążenia od 0 do 30,38 kN z prędkością 10,5 kN/min, następnie przez 50 godzin utrzymywana była stała wartość siły wymuszającej, po których próbkę ponownie obciążano, aż do jej rozerwania z prędkością 0,105 kN/min. Wartość stałego obciążenia (30,38 kN) stanowiła 60% średnich wartości sił uzyskanych w trakcie badań na rozciąganie, opisanych w punkcie 4.5.2.

Otrzymane wyniki badań, zarejestrowane w trakcie trwania całego eksperymentu (ponad 50 godzin), przedstawione zostały na Rys. 4.24. Należy zauważyć, iż uzyskano założony kształt obciążenia próbki (przyrost siły, wytrzymanie oraz ponowny przyrost do rozerwania, Rys. 4.24a). Pomiar odkształceń realizowany był przez dwa czujniki odkształceń: FBG2 oraz FBG3. Dodatkowo zastosowany został jeszcze jeden przetwornik FBG, rejestrujący fluktuacje temperatury w trakcie trwania eksperymentu. Na Rys. 4.24b przedstawione zostały uzyskane charakterystyki odkształceń kompozytu (z uwzględnieniem lokalnych zmian temperatury), rejestrowane po dwóch stronach próbki NOL. Należy zauważyć, iż próbka odkształcała się asymetrycznie po obydwu stronach. Wynika to z błędu technologicznego powstałego w trakcie nawijania próbki (nierównomiernym rozkładzie włókna węglowego po obwodzie próbki, bądź też jego lokalnej ondulacji). Wartość maksymalnych zarejestrowanych odkształceń wynosiła około 1,02% dla czujnika oznaczonego FBG2 oraz 0,97% dla czujnika FBG3. Nie była to jednak wartość maksymalnych odkształceń przy rozerwaniu. Czujniki zostały uszkodzone na chwilę przed całkowitym zniszczeniem badanej próbki. Na kolejnych wykresach (Rys. 4.24c oraz Rys. 4.24d) przedstawiono wykresy zarejestrowane przez dwa czujniki emisji akustycznej (oznaczone: AE1 oraz AE2). Należy zauważyć, iż przebieg całkowitej zarejestrowanej liczby zdarzeń akustycznych (Hits) ma charakter zbliżony do przebiegu zadanego obciążenia. Wzrasta on wraz z przyrostem siły do wartości stałego obciążenia. Następnie stabilizuje się w trakcie trwa-

nia pełzania materiału kompozytowego, aby ponownie wzrosnąć wraz z ponownym przyrostem obciążenia.

Zarejestrowana wartość skuteczna sygnału EA (ozn. RMS-Noise) jest niemal stała w trakcie trwania procesu pełzania próbki. Natomiast w trakcie przyrostu obciążenia widoczne są charakterystyczne piki, związane ze wzrostem liczby defektów w materiale kompozytowym (Rys. 4.24d).

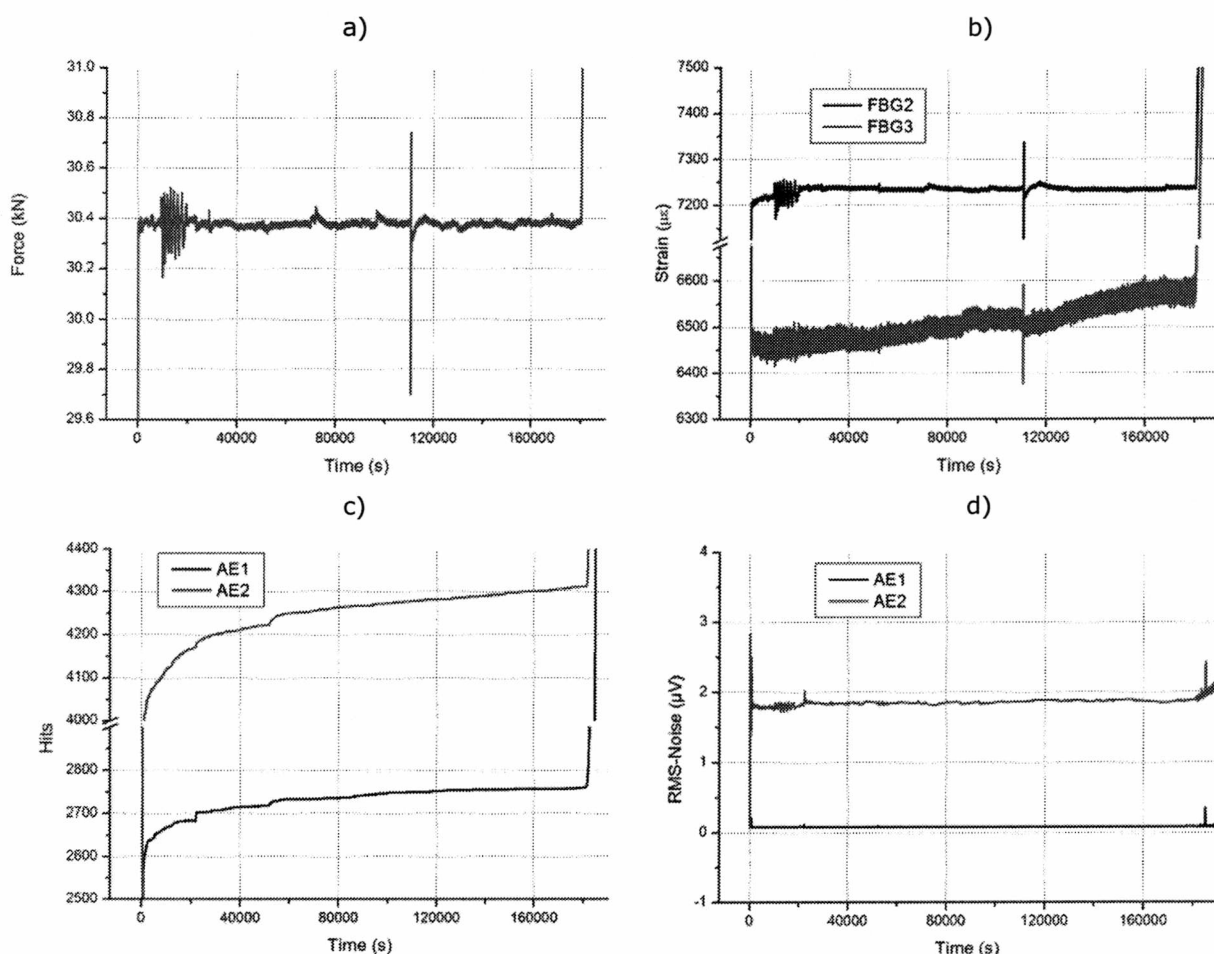


Rys. 4.24. Próba na pełzanie próbki typu NOL przez 50 godzin:

- a) przyrost siły rozciągającej (Force),
- b) zmiana odkształceń (Strain) zarejestrowana czujnikami FBG,
- c) przyrost liczby zdarzeń akustycznych (Hits) zarejestrowany przez czujniki EA,
- d) sygnał RMS-Noise zarejestrowany przez czujniki EA.

Poniżej (Rys. 4.25) przedstawiono raz jeszcze uzyskane wyniki pomiarowe, skupiając się na okresie utrzymywania stałej wartości przyłożonego obciążenia (proces pełzania). Należy zauważyć, iż przy praktycznie stałej wartości siły, odkształcenia rejestrowane przez jeden z czujników światłowodowych (FBG3), powoli rosną (od ok. 6465 µε do 6583 µε). Oznacza to, że postępuje lokalna degradacja materiału kompozytowego i w rzeczywistości występuje pełzanie badanej próbki. Równocześnie odkształcenia rejestrowane po

drugiej stronie próbki (FBG2) mają niemal stałą wartość, poza okresem fluktuacji w początkowym etapie eksperymentu oraz pikiem w 110754 sekundzie (niestabilności związane ze sterowaniem siłą maszyny hydraulicznej). Należy także podkreślić, że wraz ze wzrostem rejestrowanych odkształceń, następuje równoczesny wzrost całkowitej liczby zdarzeń akustycznych rejestrowanych przez przetworniki EA. Szczególnie wyraźne jest to dla czujnika oznaczonego AE2, który zlokalizowany był po tej samej stronie próbki NOL co czujnik FBG3. Wspomniany wzrost liczby zdarzeń akustycznych nie był związany z występowaniem zdarzeń wysokoenergetycznych. Wykres sygnału RMS jest praktycznie stały w całym analizowanym zakresie.

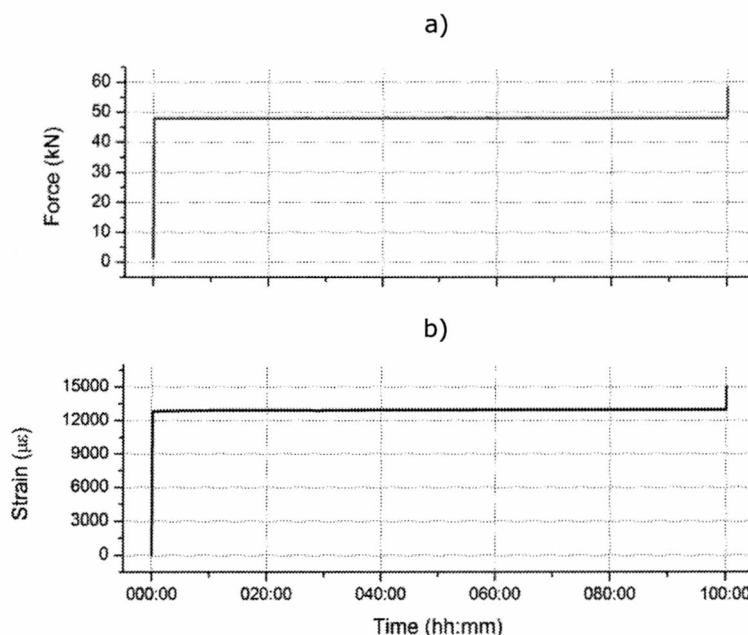


Rys. 4.25. Próba na pełzanie próbki typu NOL w wybranym fragmencie czasu (tylko pełzanie):

- a) przyrost siły rozciągającej (Force),
- b) zmiana odkształceń (Strain) zarejestrowana czujnikami FBG,
- c) przyrost liczby zdarzeń akustycznych (Hits) zarejestrowany przez czujniki EA,
- d) sygnał RMS-Noise zarejestrowany przez czujniki EA.

Druga seria badań przeprowadzona została w sposób analogiczny do opisywanego powyżej z tą różnicą, że wartość obciążenia stałego ustalono na 48,07 kN (co stanowiło 97% średnich sił niszczących uzyskanych we wcześniejszych badaniach), a czas jego

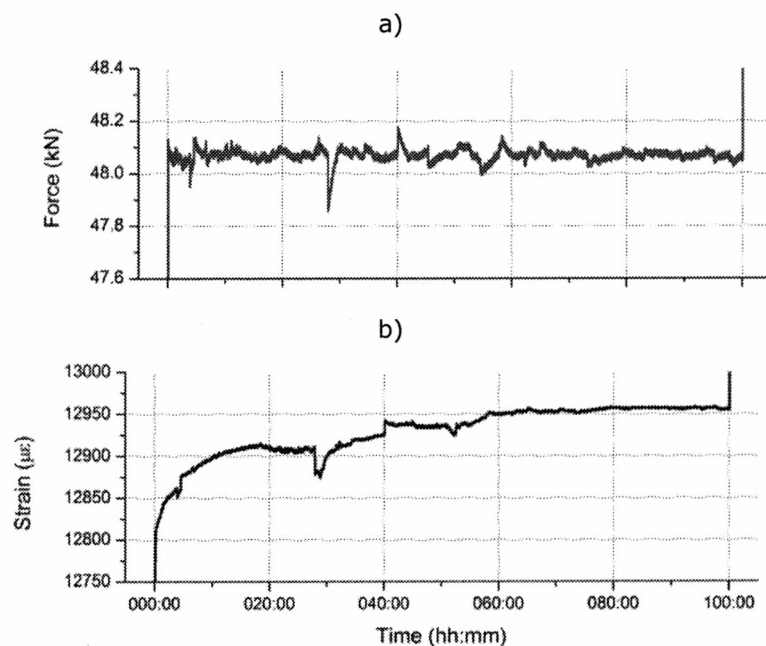
trwania przyjęto na 100 godzin. Ponadto przyrost obciążenia w pierwszej fazie eksperymentu zaprogramowano na 10,5 kN/min. W trakcie tych badań pomiary realizowane były jedynie przez światłowodowe czujniki odkształceń FBG. Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono na Rys. 4.26 i kolejnych.



Rys. 4.26. Próba na pełzanie próbki typu NOL przez 100 godzin:

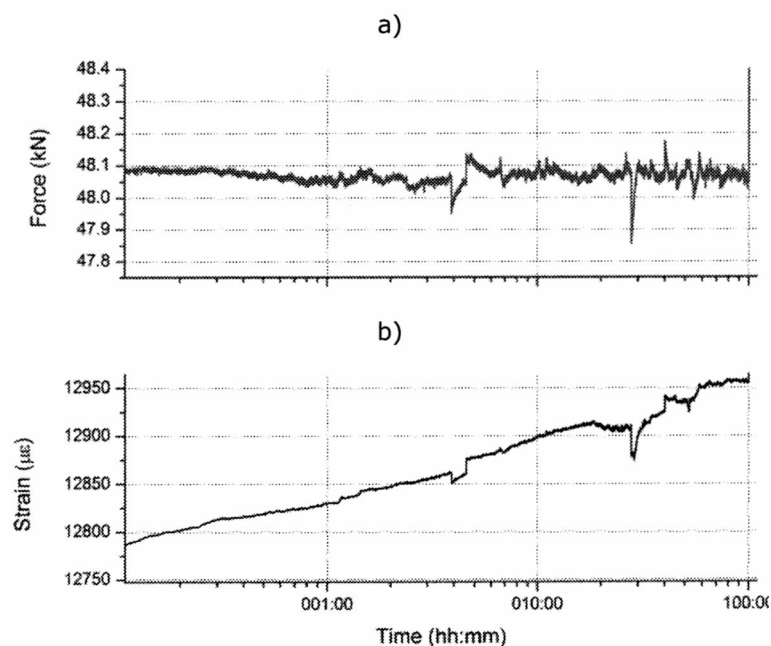
- a) przyrost siły rozciągającej (Force),
- b) zmiana odkształceń (Strain) zarejestrowana czujnikami FBG.

Na przedstawionym poniżej rysunku (Rys. 4.27) pokazane zostały szczegółowe wyniki pomiarów sił oraz odkształceń zarejestrowane w trakcie 100 godzin pełzania kompozytowej próbki NOL. Należy zauważyć, iż praktycznie w całym czasie trwania eksperymentu uzyskano stabilny wykres obciążeń (Rys. 4.27a). Równocześnie można zauważyć, że przy stałym obciążeniu materiał kompozytowy powoli się odkształcał. Największą dynamikę zmian można było zaobserwować w trakcie pierwszych 11 godzin trwania eksperymentu. Następnie wystąpiła kilkunastu godzinna stabilizacja przyrostu deformacji, po czym ponownie można było zaobserwować powolny wzrost rejestrowanych wartości. Opisywane zmiany sygnału odkształceń szczególnie widoczne są na wykresie, w którym czas przedstawiony jest w funkcji logarytmicznej (Rys. 4.28). Uzyskane wyniki potwierdzają, że w badanej próbce postępuje lokalna degradacja materiału kompozytowego i w rzeczywistości występuje jej pełzanie.



Rys. 4.27. Próba na pełzanie próbki typu NOL przez 100 godzin (wybrany fragment czasu):

- a) przyrost siły rozciągającej (Force),
b) zmiana odkształceń (Strain) zarejestrowana czujnikami FBG.



Rys. 4.28. Próba na pełzanie próbki typu NOL przez 100 godzin (wybrany fragment czasu, skala logarytmiczna):

- a) przyrost siły rozciągającej (Force),
b) zmiana odkształceń (Strain) zarejestrowana czujnikami FBG.

5 Badania wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych do gromadzenia sprężonych paliw

Jak już zostało wspomniane we wstępie niniejszej pracy, rola paliw gazowych w transporcie, głównie samochodowym, systematycznie rośnie. Są ku temu znane powody ekonomiczne, ekologiczne, eksploatacyjne, polityczne, itp. W ostatnich latach w UE prowadzono, lub nadal się realizuje, wiele projektów (np.: StorHy, HyWay, InGas), mających na celu upowszechnienie w motoryzacji metanu i wodoru.

Dominującym, szczególnie w samochodach osobowych, staje się gromadzenie metanu i wodoru w zbiornikach wysokociśnieniowych, które z kolei oznacza się odpowiednio jako CNG (ang.: Compressed Natural Gas) oraz CH₂ (ang.: Compressed Hydrogen). Gaz ziemny magazynowany jest w zbiornikach pod ciśnieniem roboczym (ang.: Nominal Working Pressure - NWP) równym 200 bar / 20 MPa (w USA dopuszcza się nawet 260 bar / 26 MPa), natomiast dla zbiorników CH₂, najnowszej, czyli 4. generacji, NWP wynosi 700 barów / 70 MPa.

Wprowadzenie na szeroką skalę lekkich, wysokowyężonych zbiorników kompozytowych do paliw gazowych wymaga skutecznego rozwiązania wielu problemów. Wymienić tutaj należy szczególnie dwa, swego rodzaju „syntetyczne”, a mianowicie:

- optymalizacja technologii wytwarzania w celu redukcji masy, a więc i kosztów produkcji, umożliwiającą z kolei masowe stosowanie zbiorników,
- zapewnienie bezpieczeństwa użytkowania zbiorników w okresie od 10 do 15 lat eksploatacji.

Zasadne jest podkreślenie, iż wysokociśnieniowe lekkie zbiorniki kompozytowe do gromadzenia metanu oraz wodoru, stosowanych jako paliwa samochodowe, są wzorcowym przykładem produktu innowacyjnego. Świadczą o tym następujące aspekty:

- materiałowe (ekstremalnie wytrzymałe włókna węglowe i aramidowe na warstwę nośną oraz polimery termoplastyczne typu high density na szczelne elementy wewnętrzne, czyli tzw. dętkę lub liner. Stopień nasycenia przemysłu i gospodarki tą klasą materiałów jest jedną z kluczowych miar stosowanych do oceny zaawansowania technologicznego krajów),
- konstrukcyjne (obliczenia wytrzymałościowe wymagają nowych hipotez i modeli ciał konstytutywnych, a optymalizacja geometrii nawoju jest otwartym zagadnieniem inżynierskim). Masa własna butli dla samochodu osobowego musi wynosić 30-40 kg i zapewniać zasięg samochodu do 600 km, przy jednym tankowaniu,
- technologiczne (wytwarzanie konstrukcji metodą nawijania, skrócenie czasu wytwarzania i potaniecie produkcji umożliwiające upowszechnienie napędu gazowego),
- bezpieczeństwa (zbiornik na metan musi zapewnić wieloletnią eksploatację przy ciśnieniu 200 barów i wytrzymałość na rozerwanie przy 600 barach. Parametry te dla

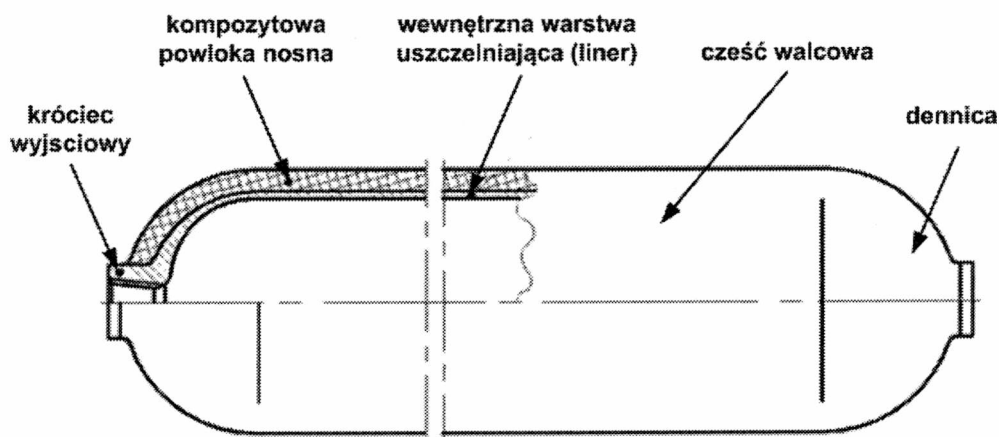
butli na wodór wynoszą odpowiednio: 700 barów i 1650 barów. System sensorów powinien zapewnić ocenę stanu bezpieczeństwa butli on-line w czasie produkcji, eksploatacji i okresowej kontroli pojazdu. Bezpieczeństwo wymaga akredytowanych laboratoriów, stosujących rygorystyczne procedury i międzynarodowe normy.

5.1 Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe

5.1.1 Budowa i rodzaje

Lekkie, kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe wykorzystuje się w przemyśle motoryzacyjnym do magazynowania paliwa gazowego w postaci sprężonego gazu ziemnego (CNG) lub wodoru (CH_2). Producenci zbiorników wykorzystują najczęściej tzw. metodę nawijania włókna długiego, stosując różne sposoby ułożenia wysokowytrzymałych włókien w ścianie nośnej zbiorników. Występuje związek pomiędzy nawiniętą strukturą a właściwościami wytrzymałościowymi, a także masą oraz ceną zbiornika. W czasie eksploatacji zbiorniki wymagają permanentnej kontroli, głównie odkształceń kompozytowej ścianki nośnej [126].

Duża popularność zbiorników kompozytowych jest następstwem znacznej redukcji masy, w porównaniu do zbiorników stalowych nawet czterokrotną oraz z szybkim upowszechnianiem się wysokosprężonych paliw gazowych.

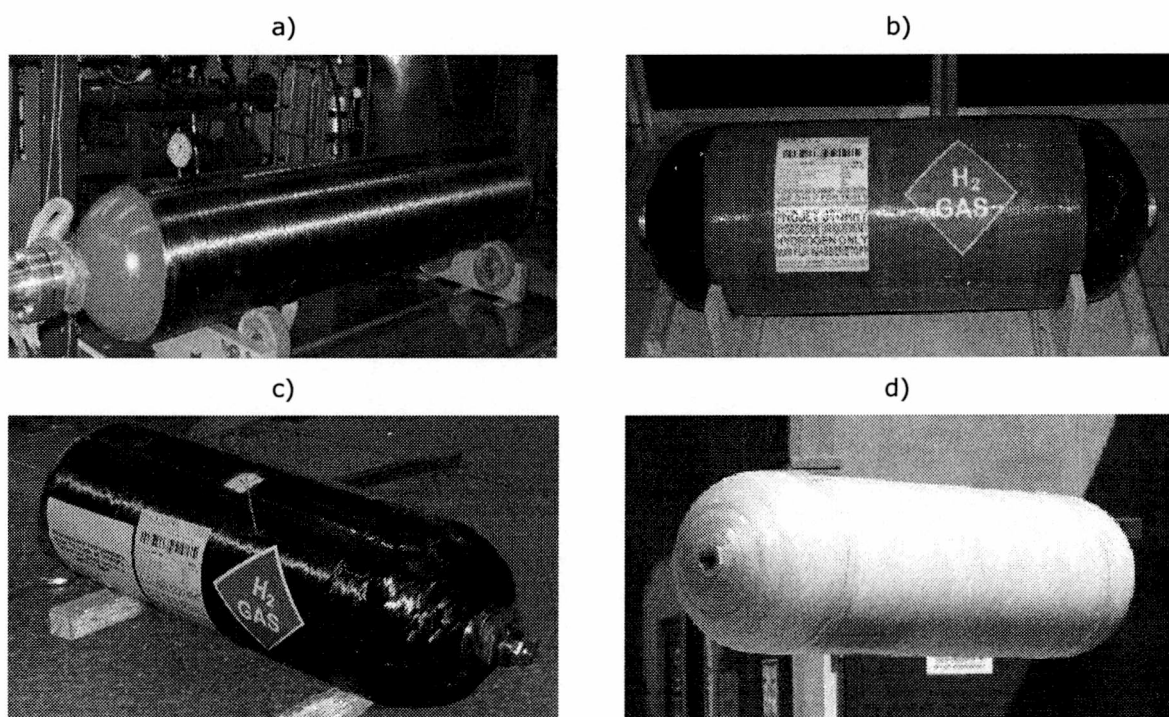


Rys. 5.1. Schemat budowy wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego typu 3-go lub 4-go [126].

Zbiorniki kompozytowe do gromadzenia sprężonych gazów (Rys. 5.1) są zbudowane z dwóch warstw. Warstwa wewnętrzna (tzw. liner, czyli dętka) jest odpowiedzialna za gromadzenie gazu oraz nadanie całej konstrukcji odpowiedniego kształtu. Musi ona również zapewnić barierę dla gazu, tak by jego cząsteczki nie przenikały poza zbiornik. Liner może być wykonany z metalu (odpowiednie gatunki stali bądź stopy aluminium) lub też z tworzyw sztucznych. Warstwa zewnętrzna przenosi obciążenia i najczęściej jest wyko-

nana z wysokowytrzymałych włókien (szklane, węglowe, rzadziej aramidowe) nasycanych żywicą epoksydową lub tworzywami termoplastycznymi. Najczęściej na warstwę nośną stosowane są kompozyty węglowo-epoksydowe (ang.: Carbon Fiber Reinforced Composite, CFRC) lub szklano-epoksydowe (ang.: Glass Fiber Reinforced Composite, GFRC). Włókna warstwy kompozytowej ułożone są w sposób uporządkowany i zaprogramowany, stosownie do przewidywanych obciążeń konstrukcji [73].

Na rynku spotkać można także rozwiązania tzw. hybrydowe (np. zbiorniki produkowane przez firmę Xperion), gdzie bezpośrednio na linerze znajduje się stosunkowo cienka warstwa kompozytu węglowego, a całość jest dodatkowo wzmocniona kompozytem GFRC. Przykładowe konstrukcje kompozytowych zbiorników do gromadzenia paliw gazowych przedstawiono poniżej (Rys. 5.2).

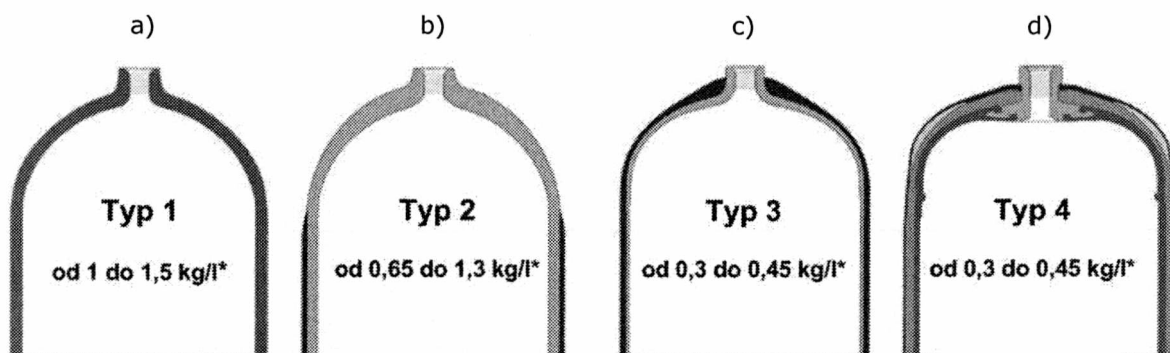


Rys. 5.2. Przykłady zbiorników wysokociśnieniowych do gromadzenia CNG i CH₂: typu 2-go (a) oraz typu 4-go (b, c, d).

W standardach dotyczących zbiorników CNG oraz zbiorników na paliwo wodorowe różni się 4 podstawowe typy zbiorników ciśnieniowych:

- typ 1 – zbiornik metalowy bezszwowy (Rys. 5.3a),
- typ 2 – zbiornik złożony z lineru metalowego (bezszwowego) z powłoką kompozytową, w której włókna ułożone są obwodowo na części walcowej zbiornika (Rys. 5.3b),
- typ 3 – zbiornik zbudowany z lineru metalowego (bezszwowego lub spawanego), którego cała powierzchnia pokryta jest materiałem kompozytowym (Rys. 5.3c),

- typ 4 – podobnie jak typ 3, ale z niemetalowym linerem (z tworzywa sztucznego), którego cała powierzchnia pokryta jest materiałem kompozytowym (Rys. 5.3d).



Rys. 5.3. Różne typy konstrukcji zbiorników wysokociśnieniowych do gromadzenia paliw gazowych (* - typowa waga zbiornika na 1 litr jego objętości dla zbiorników o nominalnym ciśnieniu pracy 20 MPa).

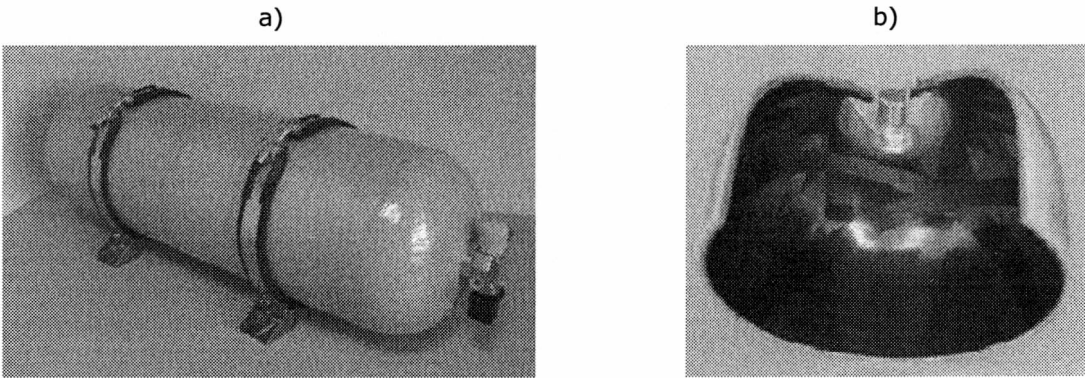
Od pewnego czasu zauważyć można wzrost zainteresowania producentów wysokociśnieniowych zbiorników tzw. kompozytami hybrydowymi. Są to konstrukcje, w których wykorzystuje się co najmniej dwa różne rodzaje wzmocnienia (np. włókno szklane i węglowe) w osnowie. Główną przyczyną stosowania różnych włókien w materiale kompozytowym jest redukcja kosztów końcowego produktu. Firmy, które posiadają w swojej ofercie butle z kompozytów hybrydowych to m.in.: Composite Aquitaine, EDO Corporation, Raufoss A/S, MAN Technologie, Luxfer, Rutgers, Ciba, Scott, Structural, Xperion.

Tab. 5.1. Porównanie parametrów ekonomicznych i konstrukcyjnych zbiorników wykonanych z różnych materiałów (kompozyt węglowo-epoksydowy CFRC, szklano-epoksydowy GFRC, hybrydowy CFRC+GFRC oraz referencyjny stalowy); na podst. [127].

Zbiornik referencyjny: 40 l	CFRC Typ 4-ty	Konstrukcja hybrydowa	GFRC Typ 4-ty	Stalowy
Ciężar / litr [kg]	0,25÷0,3	0,35÷0,45	0,74	0,9÷1,15
Cena / litr [€]	8÷10	~5	~5	3,5÷4
Objętość względna	0,95	0,85÷0,94	0,75÷0,8	1
Kompozyt: Liner: 3÷4 mm	5 mm CFRC	10 mm CFRC + GFRC	15 mm GFRC	5 mm

Przybliżony koszt zbiornika do gromadzenia sprężonego metanu (NWP = 200 bar), wykonanego w technologii hybrydowej, wynosi ~5 €/litr objętości wodnej gromadzonego

paliwa. Szczegółowe porównanie zbiorników wysokociśnieniowych, wykonanych z różnych materiałów, przedstawiono powyżej w Tab. 5.1. Można zauważyć, iż najtańszym sposobem na gromadzenie sprężonych paliw jest zastosowanie zbiorników typu 1-go, czyli całkowicie stalowych. Jednakże wraz z stosunkową niską ceną należy się liczyć z wysokim ciężarem butli. Całkowicie odwrotna sytuacja jest w przypadku zbiorników typu 4-go, wzmocnionych włóknem węglowym. Charakteryzują się one najmniejszym ciężarem przy równocześnie najwyższej cenie (ze względu na wysoki koszt włókna). Konstrukcje pośrednie, zarówno pod względem ciężaru jak i kosztów, to zbiorniki wzmocnione włóknem szklanym oraz hybrydowe. Ze względu na mniejszą grubość ścianki zbiornika, niewielką przewagę zyskują zbiorniki hybrydowe. Wynika to z większej ilości paliwa, którą można gromadzić w tej samej objętości zewnętrznej systemu gromadzenia paliwa. Dzięki temu, pomimo zastosowania drogich włókien węglowych, cena jednostkowa w obydwu przypadkach jest zbliżona i jak już wspomniano wynosi ok. 5 €/litr. Przykładową konstrukcję butli hybrydowej przedstawiono na Rys. 5.4.



Rys. 5.4. Przykładowy zbiornik hybrydowy firmy Xperion [127, 128].

Tab. 5.2. Charakterystyka podstawowych parametrów zbiorników wysokociśnieniowych spełniających wymogi dla sprężonego gazu ziemnego CNG i wodoru w zależności od ich typu [2, 4, 129].

	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Ciśnienia pracy (NWP)	do 20 MPa	do 20 MPa	od 20 do 35 MPa	do 70 MPa
Współczynniki bezpieczeństwa	2,25	Od 2,35 do 2,75 (w zależności od włókna)	od 2,35 do 3,65 (w zależności od włókna)	od 2,35 do 3,65 (w zależności od włókna)
Ciśnienia niszczące	45 MPa	od 47 do 73 MPa	od 47 do 127,5 MPa	od 164 do 255,5 MPa
Orientacyjna cena w PLN	od 50 do 1.000	od 1.000 do 3.000	od 1.000 do 15.000	powyżej 30.000 (4.000 pozwoleń na masową komercjalizację)

Szacunkowe dane mówią, iż aktualnie produkuje się na świecie około siedmuset rodzajów gazowych zbiorników kompozytowych, różniących się zastosowaniem, konstrukcją i technologią wykonania [130]. Z tej obszernej grupy, najwyższymi wymaganiami obarczone są zbiorniki przeznaczone do magazynowania sprężonego gazu ziemnego i sprężonego wodoru w pojazdach. Powyżej w tabeli (Tab. 5.2) zebrane zostały ich podstawowe parametry, jak i wymagania co do współczynników bezpieczeństwa.

5.1.2 Zastosowanie, zalety, wymagania

Rosnąca popularność wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych jest związana przede wszystkim ze znaczną redukcją masy zbiornika kompozytowego, w porównaniu do zbiorników stalowych, przy zapewnieniu odpowiednio wysokiej wytrzymałości mechanicznej [121, 1, 131]. Nowoczesne konstrukcje kompozytowe znajdują zastosowanie nie tylko w przemyśle samochodowym (jako wspomniane wcześniej nowoczesne zbiorniki paliwa), ale również w wielu dziedzinach takich jak: przemysł lotniczy, czy też służby ratownicze, gdzie w sposób szczególny redukcja masy ma wpływ na powszechność ich aplikacji. Inne zalety zbiorników kompozytowych to:

- brak iskrzenia przy otarciach i uderzeniach,
- brak odłamków w razie zniszczenia zbiornika (np. przestrzelenia, rozerwania),
- duża odporność chemiczna,
- brak wyraźnego przejścia plastyczno-kruche w niskich temperaturach,
- powstanie nieszczelności (bez rozerwania), umożliwiającej ewakuację gazu i zminimalizowanie niebezpieczeństwa rozerwania [130, 105].

Jak już wcześniej wspomniano zbiorniki przeznaczone do gromadzenia CNG oraz CH₂, jako że mogą stanowić duże zagrożenie dla użytkowników, są obarczone najwyższymi wymaganiami w zakresie bezpieczeństwa. Szacuje się, iż obszar zagrożenia, w trakcie eksplozji pełnego samochodowego zbiornika metanu, ma średnicę 250 m, a w przypadku wodoru może sięgać nawet 1000 m [132]. Dlatego też kluczowe znaczenie ma zapewnienie bezpieczeństwa użytkowania, w czasie pełnego dziesięcioletniego okresu eksploatacji.

Współczynniki bezpieczeństwa są rozumiane jako stosunki największych naprężeń występujących we włóknach zbrojenia w momencie zniszczenia do naprężeń przy ciśnieniu pracy. Oznacza to, że udział osnowy polimerowej w przenoszeniu obciążeń jest pomijany. W poniższej tabeli (Tab. 5.3) zabrano wartości minimalnych współczynników bezpieczeństwa oraz minimalnych wartości ciśnień niszczących (rozrywania) dla różnych typów zbiorników wysokociśnieniowych (CNG/wodór), w zależności od stosowanego materiału na powłokę nośną zbiornika. Należy zauważyć, iż w ekstremalnych przypadku (zbiornik z kompozytem szklanym) ciśnienie rozrywania dla zbiornika CNG (NWP = 20 MPa) musi

przekraczać 73 MPa, natomiast dla zbiornika na wodór (NWP = 70 MPa) wynosi ono co najmniej 256 MPa. Tak duże wartości ciśnień wymuszają na producentach zbiorników stosowanie grubych warstw na powłoki nośne, co nie pozostaje bez wpływu na cenę końcową zbiornika.

Najlepszymi parametrami mechanicznymi charakteryzują się włókna węglowe. Ponadto są one niemal obojętne na niekorzystne oddziaływanie środowiska oraz charakteryzują się bardzo wysoką wytrzymałością zmęczeniową [105]. Jednakże ich stosunkowo wysoka cena wynosząca obecnie ~20 €/kg (w porównaniu do włókna szklanego ~1,5 €/kg), znacząco wpływa na cenę końcową gotowego produktu. Dlatego też, niektórzy producenci zbiorników, w celu zmniejszenia kosztów produkcji, decydują się na wspomniane wcześniej konstrukcje hybrydowe, gdzie stosunkowo niewielki udział włókna węglowego do szklanego (np. warstwy o grubościach odpowiednio: 5 i 10 mm) mogą z powodzeniem spełniać wymagania stawiane w normach.

Tab. 5.3. Wartości minimalnych współczynników bezpieczeństwa oraz ciśnień niszczących w zależności od stosowanych powłok nośnych zbiorników wysokociśnieniowych dla zbiorników (CNG/wodór, NWP odpowiednio: 20 i 70 MPa), na podst. [2, 4, 129].

	Typ 1		Typ 2		Typ 3		Typ 4	
Powłoka nośna	Wsp. bezpiecz.	Ciśnienie niszczące CNG/CH2 [MPa]	Wsp. bezpiecz.	Ciśnienie niszczące CNG/CH2 [MPa]	Wsp. bezpiecz.	Ciśnienie niszczące CNG/CH2 [MPa]	Wsp. bezpiecz.	Ciśnienie niszczące CNG/CH2 [MPa]
Metal	2,25	45/158	—		—		—	
Kompozyt szklany	—		2,75	55/193	3,65	73/256	3,65	73/256
Kompozyt aramidowy	—		2,35	47/165	3,1	62/217	3,1	62/217
Kompozyt węglowy	—		2,35	47/165	2,35	47/165	2,35	47/165
Hybrydowy	—		*					

* - dotyczy zbiorników z dokumentacją obliczeniową według udziałów włókien z uwzględnieniem wymienionych współczynników

Podstawowymi parametrami opisującymi „użyteczność” systemów gromadzenia paliw (w tym paliwa w postaci gazowej w zbiornikach ciśnieniowych, w postaci skroplonej w zbiornikach kriogenicznych oraz w postaci chemicznych związków w ciałach stałych), pozwalającymi w łatwy sposób porównywać różne rozwiązania techniczne, są:

- gęstość wagowa systemu (ang. system gravimetric density) – stosunek gromadzonego paliwa (w kg) do masy całego systemu przechowującego (w tym: zbiornik oraz dodatkowy osprzęt) wypełnionego paliwem, wyrażona w [%];
- gęstość objętościowa systemu (ang. system volumetric density) – stosunek gromadzonego paliwa (w kg) do objętości zewnętrznej całego systemu przechowywania paliwa, wyrażona w [kg/l].

W chwili obecnej światowi liderzy w produkcji zbiorników (m.in. Ullit, Dynatek, Faber, Xperion) prowadzą intensywne badania nad zbiornikami typu 4-tego do gromadzenia sprężonego wodoru, które charakteryzują się najwyższymi wartościami wspomnianych wyżej parametrów. Zbiorniki te przeznaczone są do pracy pod ciśnieniem roboczym rzędu 70 MPa, a wartości ciśnień niszczących przekraczają 164,5 MPa (dla powłoki nośnej wykonanej z włókna węglowego).

Budowa zbiornika czwartej generacji jest związana z wykorzystaniem wysokomodułowych (o wysokiej wartości modułu E) włókien węglowych na oplót nośny oraz wysokiej jakości tworzyw sztucznych (o dużej gęstości) na liner, zapewniających szczelność całej konstrukcji. Prace projektowe nad zbiornikami pierwszej, drugiej i trzeciej generacji, w tym nad zbiornikami CNG, zostały już niemal całkowicie ukończone. Opanowana została zarówno technologia ich produkcji jak i dobór odpowiednich materiałów konstrukcyjnych. Ponadto przeprowadzono wymagane badania akredytujące i wdrożono je do masowej produkcji. Nie ma natomiast na rynku (pomijając badane aktualnie prototypy) zbiornika czwartej generacji, który spełniałby wymagania bezpieczeństwa i rozsądnych kosztów produkcji.

W projektowaniu wysokociśnieniowych zbiorników dla CH₂, nie sprawdza się wykorzystanie „efektu skali”, tzn. korzystanie i ekstrapolowanie doświadczeń zdobytych na zbiornikach CNG. Stosowanie opanowanych wcześniej procedur obliczeniowych, oprogramowania komercyjnego do projektowania, technologii, itd., prowadzi w efekcie do pogrubiania ścianki oplotu nośnego. Wysoka wartość współczynnika bezpieczeństwa (w chwili obecnej wynosi on 2,35 [2]) powoduje, że grubość ścianki płaszcza nośnego zbiornika CH₂, wykonanego z drogiej odmiany włókna węglowego, wynosi 15 mm lub więcej. Skutkuje to wysoką ceną końcową butli, co uniemożliwia dziś jej powszechne stosowanie. Jedno z rozwiązań, to oczekiwanie na jeszcze lepszy materiał; inne, to dalsze poszukiwania w zakresie technologii, np. zastosowanie syciw termoplastycznych [126]. Ponadto prowadzone są prace, które mają na celu udoskonalenie procesu nawijania i uzyskanie oplotu nośnego, w którym będzie zapewniona najlepsza praca wiązek włókien wzmacniających [121, 105, 133, 134].

5.2 Metodyka badań dla kompozytowych butli wysokociśnieniowych

W krajach Unii Europejskiej wymagania z zakresu bezpieczeństwa użytkowania wysokociśnieniowych zbiorników przeznaczonych do gromadzenia paliwa CNG w pojazdach są zebrane w dyrektywie unijnej ECE R110 [4]. Oznacza to, że każdy komponent systemu gromadzenia paliwa, w tym także oprócz zbiornika: regulatory ciśnienia, zawory, zawory bezpieczeństwa (tzw. PRD, ang.: Pressure Relief Device), przewody ciśnieniowe i inne, wymaga certyfikacji zgodności ze wspomnianą wcześniej dyrektywą. Oznacza to, że każdy producent, który chce wprowadzić swoje produkty (np. zbiorniki) na rynek europejski musi poddać się bardzo szczegółowej procedurze certyfikacji, wykonywanej przez uprawnione do tego jednostki badawcze.

W przypadku zbiorników przeznaczonych do gromadzenia sprężonego wodoru (CH_2) brakuje ciągle tzw. dokumentów zharmonizowanych. Oznacza to istnienie wielu norm opisujących badania i wymagania dla tych wyrobów, jednakże wciąż prowadzone są intensywne prace na rzecz nowych i wyważonych standardów (np. [2, 129]). Ponadto materiałem wyjściowym, do formułowania standardów dotyczących zbiorników paliwa wodowego w pojazdach, były normy i regulacje dotyczące CNG. Okazuje się, że zastosowanie wspomnianego wcześniej efektu skali, przez proporcjonalne podwyższanie wymagań dla zbiorników CH_2 , nie sprawdza się i niektóre z określonych wymogów są niemożliwe do spełnienia przez wytwórców, a jednocześnie ich wpływ na bezpieczeństwo wyrobu jest dyskusyjny [105].

Tab. 5.4. Wybrane badania kwalifikujące dla zbiorników wysokociśnieniowych przeznaczonych do gromadzenia paliw (w nawiasach podano angielskie nazwy stosowane w literaturze przedmiotu, X – oznacza konieczność realizacji badań).

Lp.	Rodzaj badania	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
1.	Statyczna próba na rozrywanie (Hydrostatic pressure burst test)	X	X	X	X
2.	Badania cykliczne w temperaturze pokojowej (Ambient temperature pressure cycling test)	X	X	X	X
3.	Test na odporność chemiczną (Acid environment test)		X	X	X
4.	Próba ogniowa (Bonfire test)	X	X	X	X
5.	Próba na przestrzelenie (Penetration test)	X	X	X	X
6.	Odporność na wady (Composite flaw tolerance tests)		X	X	X

7.	Pełzanie w wysokiej temperaturze (High temperature creep test)		X	X	X
8.	Przyspieszone badania wytrzymałościowe (Accelerated stress rupture test)		X	X	X
9.	Próba zrzutowa (Impact damage test)			X	X
10.	Test na przenikalność (Permeation test)				X
11.	Ocena działania zaworu bezpieczeństwa (Pressure relief device requirements)	X	X	X	X
12.	Badania cykliczne CNG/wodór (CNG/Hydrogen gas cycling test)				X
13.	Badania cykliczne w warunkach ekstremalnych (Extreme temperature pressure cycling)		X	X	X
14.	Badania cykliczne na przeciekanie (Leak-Before-Break LBB performance test)	X	X	X	

Wspomniane powyżej normy, poza wymaganiami stawianymi materiałom stosowanym do produkcji zbiorników, zakresowi ciśnień (tj.: nominalne ciśnienie pracy, ciśnienie testowe), kryteriami projektowania, opisują również cały szereg wymaganych badań, które testowe zbiorniki muszą przejść pozytywnie, żeby konstrukcja końcowa została dopuszczona do produkcji (ang.: cylinder design qualification tests). Podstawowe badania, opisywane szczegółowo w normach dla zbiorników CNG/wodór, zostały zebrane w tabeli powyżej (Tab. 5.4).

Dodatkowo każdy z wyprodukowanych zbiorników musi zostać poddany próbie ciśnieniowej (ang.: hydrostatic pressure proof testing), w której pod ciśnieniem $1,5 \times \text{NWP}$ (czyli dla zbiorników CNG jest to ciśnienie 30 MPa, a dla zbiorników wodorowych nawet 105 MPa), utrzymywanym przez co najmniej 30 sekund, sprawdzana jest jego szczelność oraz rozszerzalność (ang.: volumetric expansion).

Oddzielna kwestią, szerzej opisywaną w odpowiednich normach, są badania przeprowadzane bezpośrednio na linerach oraz badania materiałów stosowanych do wytwarzania zbiorników, w tym:

- test na korozję (ang.: corrosion tests) - dla aluminium,
- długotrwała próba na pękanie pod obciążeniem (ang.: sustained load cracking tests) - dla aluminium,
- test na pękanie naprężeniowo-siarczkowe (ang.: sulphide stress cracking) – dla stali
- próba udarowości (ang.: impact test) – zbiorniki i linery stalowe,
- próba na rozciąganie (ang.: tensile tests) – dla stali oraz aluminium,

- test twardości (ang.: Brinell hardness test).

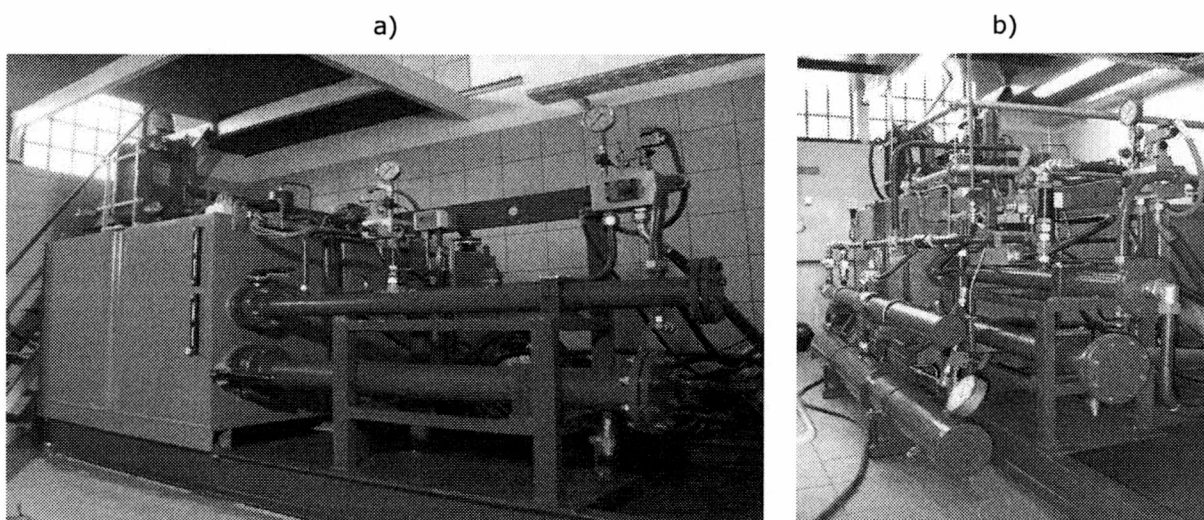
Poniżej szczegółowo opisano wybrane badania zbiorników wysokociśnieniowych, które przeprowadzane były w trakcie realizacji niniejszej pracy w Laboratorium Zbiorników Wysokociśnieniowych Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej (Politechnika Wrocławska).

5.2.1 Badania cykliczne w temperaturze pokojowej

Procedura próby cyklicznej badania kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych w temperaturze otoczenia (ang.: ambient temperature pressure cycling test) zakłada poddanie próbie 2 kompletnych zbiorników zgodnie z następującą procedurą [2, 4, 129]:

- napełnienie zbiornika cieczą nie powodującą korozji (np.: olej, woda, glikol),
- badania zbiornika (napełnianie i opróżnianie) w przedziale ciśnień od 2 MPa do 1,25 x NWP (nominalne ciśnienie pracy) z prędkością nie większą niż 10 cykli na minutę.

Zbiornik powinien być cyklowany do zniszczenia bądź też do liczby cykli równej 45000. Badany zbiornik nie może ulec zniszczeniu przed osiągnięciem wymaganej liczby cykli. W zależności od przyjętej do badań normy, powyżej 45000 cykli zbiornik może ulec rozszczelnieniu [4, 129]. Czasami dopuszczalne jest także jego rozerwanie [2].



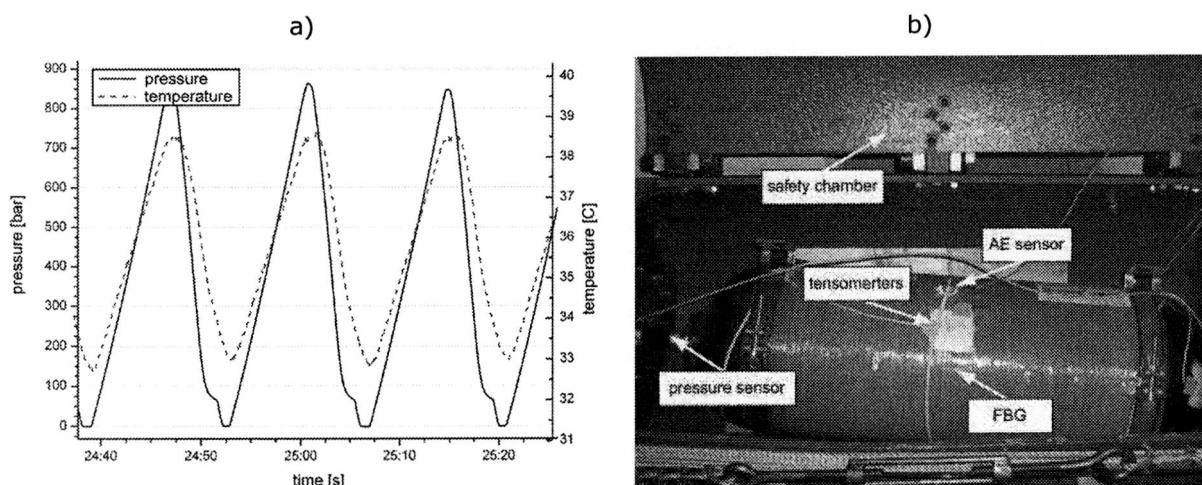
Rys. 5.5. Stanowisko hydrauliczne do badań cyklicznych wysokociśnieniowych zbiorników w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej przed (a) oraz po rozbudowie (b) o dodatkowe multiplikatory zwiększające zakres maksymalnych ciśnień z 450 do 1400 barów.

Jak już zostało wspomniane, badania zmęczeniowe zbiorników powinny być wykonywane z częstotliwością w zakresie od 1 do 10 cykli na minutę. O ile w badaniach zbiorników CNG tak duża rozpiętość nie ma specjalnego znaczenia, to przy zbiornikach CH₂ nie jest to obojętne. Po uwzględnieniu ściśliwości cieczy i rozszerzalności zbiornika CH₂ okazuje się, że do zbiornika o pojemności 40 l, w jednym cyklu należy wtłoczyć dodatkowo,

a następnie rozładować, nawet 5 l cieczy. Producenci zbiorników CH₂, ubiegający się o homologację, preferują realizować obciążanie zbiornika ciśnieniem jak najwolniej, ponieważ rozwój uszkodzeń zmęczeniowych jest wówczas powolniejszy [73]. Jednakże w takim przypadku czas badań, a tym samym ich cena, znacząco rośnie. Przykładowo całkowity czas trwania badań cyklicznych (45000 cykli) z prędkością obciążania 1 cykl/min, wynosi 750 godzin, czyli ponad 31 dób pracy „non-stop”.

Na rysunku powyżej (Rys. 5.5) pokazane zostało urządzenie, umożliwiające prowadzenie ciśnieniowych badań zmęczeniowych, zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w temperaturach ekstremalnych (wewnątrz komory klimatycznej). Urządzenie umożliwia realizację cykli ciśnienia, przy użyciu oleju, bądź glikolu, w zakresie od 0 do 150 MPa. Możliwe jest badanie pojedynczego zbiornika, jak i kilku na raz. Maksymalna pojemność badanych zbiorników może wynosić nawet 120 litrów, w zależności od rozszerzalności zbiornika w czasie badań zmęczeniowych. Urządzenie jest sterowane komputerowo i może rejestrować charakterystykę każdego cyklu z wyszczególnieniem najważniejszych danych liczbowych, np. maksymalne ciśnienie, długość cyklu (w tym czas narastania/opadania), objętość cieczy wtłoczonej w cyklu, itp. [1].

Na rysunku poniżej (Rys. 5.6a) przedstawione zostały przykładowe charakterystyki badań cyklicznych przy zmianie ciśnienia w zakresie 20-875, bar z prędkością obciążania wynoszącą 5 cykli/minutę. Dodatkowo, linią przerywaną, pokazano zmianę temperatury oleju w zbiorniku w trakcie jego cyklowania. Należy zauważyć, iż zmiany temperatury cieczy roboczej są rzędu 5,5 °C. Rys. 5.6b przedstawia natomiast widok testowego zbiornika w komorze bezpieczeństwa z zainstalowanymi na jego powierzchni dodatkowymi czujnikami (tensometry, światłowodowe siatki Bragga, emisja akustyczna).

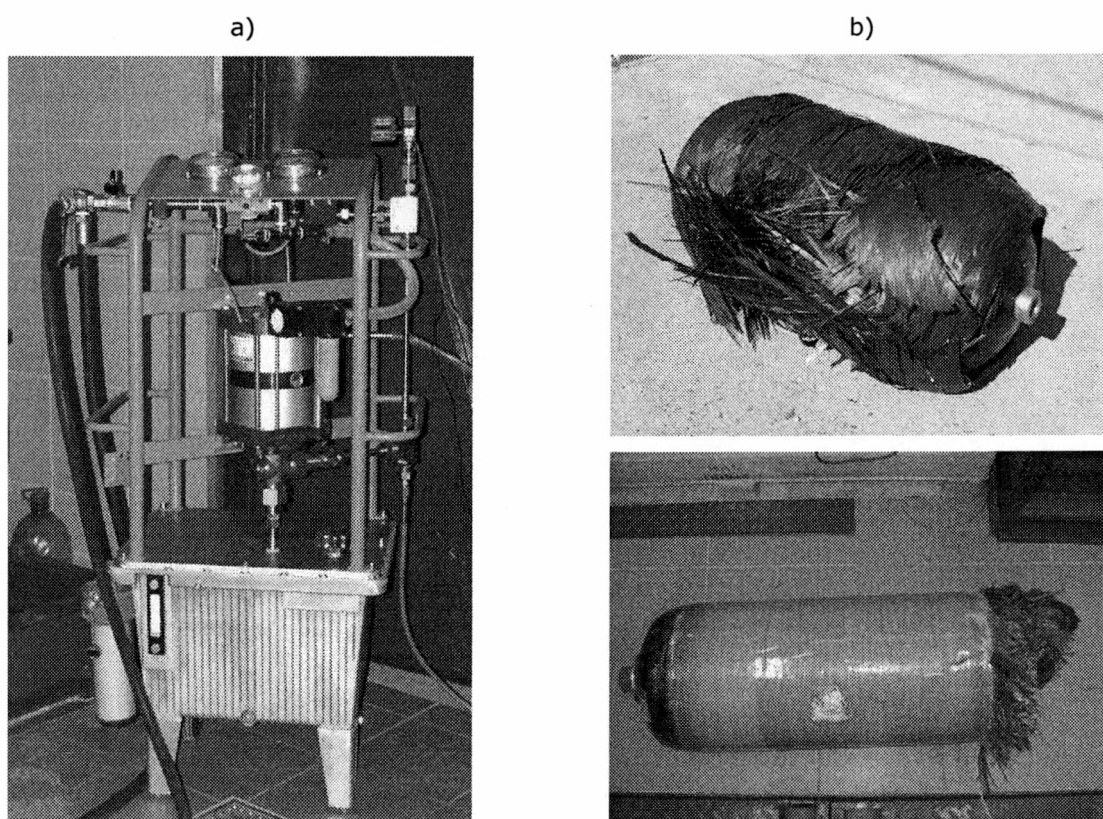


Rys. 5.6. Charakterystyka zmian ciśnienia i temperatury cieczy w trakcie badań cyklicznych, w zakresie 20-875 bar (a) oraz widok zbiornika zainstalowanego w komorze bezpieczeństwa (b).

Próby cykliczne, którym poddawane są zbiorniki, mogą doprowadzić do pojawienia się różnego rodzaju uszkodzeń (defektów) w zbiornikach. Mogą to być m.in.: uszkodzenia plastyczne linera, delaminacja warstwy kompozytowej lub/i pomiędzy warstwą linera a warstwą wzmacniającą, pęknięcia w warstwie kompozytowej [135].

5.2.2 Statyczna próba na rozrywanie

Procedura quasistatycznej próby rozrywania kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych (ang.: hydrostatic pressure burst test) zakłada poddanie próbie co najmniej trzech kompletnych zbiorników (liczba zbiorników może być inna w zależności od normy) [2, 4, 129]. Przed badaniem, testowy zbiornik jest napełniany wodą i odgazowywany, a następnie obciążany hydraulicznie w temperaturze pokojowej, począwszy od ciśnienia 0 MPa. Prędkość narastania ciśnienia podczas trwania próby nie może przekroczyć 1,4 MPa/s. Po osiągnięciu ciśnienia o wartości równej iloczynowi NWP oraz współczynnika bezpieczeństwa (ang. Burst Pressure Ratio, BPR), próba musi trwać jeszcze przez co najmniej 5 sekund, nim zbiornik ulegnie zniszczeniu.



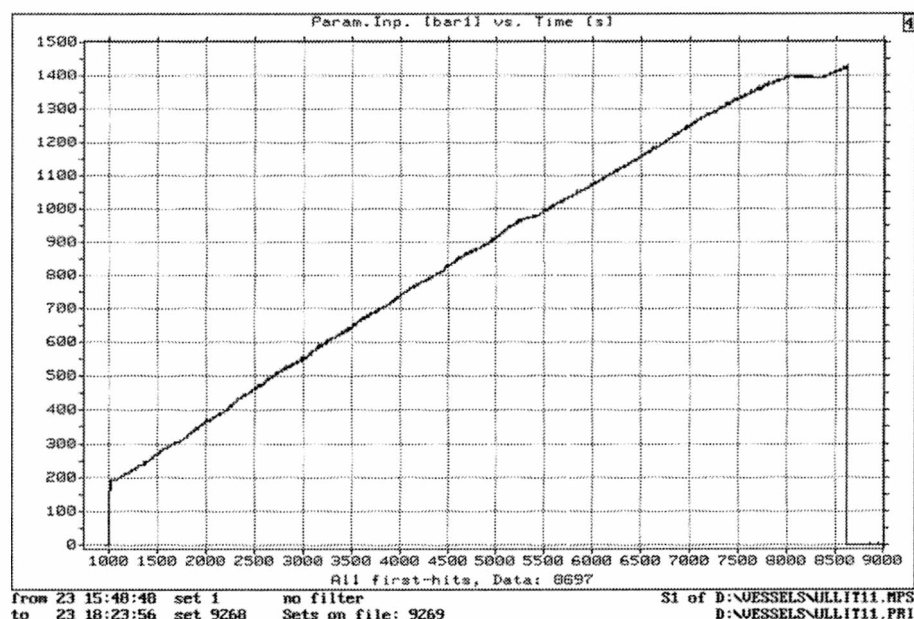
Rys. 5.7. Stanowisko do badań niszczących znajdujące się w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej (a) oraz przykładowe zbiorniki po testach (b).

Aby badanie zostało zakończone sukcesem, wartość ciśnienia rozrywającego dla kompletnego zbiornika powinna przekroczyć wartość iloczynu $NWP \times BPR$, a dla badań nisz-

czących samego linera: $NWP \times 1,25$. W przypadku badań zbiorników typu 3. i 4., o wzmocnieniu wykonanym z kompozytu węglowo-epoksydowego, za współczynnik bezpieczeństwa przyjmuje się wartość $BPR=2,35$. Zatem dla zbiorników o nominalnym ciśnieniu pracy wynoszącym 700 barów, wartość ciśnienia rozrywającego musi być większa niż 164,5 MPa.

Podobnie jak ma to miejsce w przypadku badań cyklicznych, prędkość obciążania zbiornika (ang.: rate of pressurization) w trakcie próby niszczącej ma duże znaczenie. Producenci zbiorników preferują obciążanie z dużą prędkością, ponieważ wtedy uszkodzenia warstwy nośnej nie zdążą się rozwinąć i można osiągnąć wyższe wartości ciśnień niszczących.

Na Rys. 5.7 przedstawione zostało urządzenie stosowane do przeprowadzania badań statycznych zbiorników wysokociśnieniowych oraz przykładowe zbiorniki po testach niszczących. Maksymalne ciśnienie możliwe do uzyskania na wyjściu urządzenia wynosi 300 MPa, natomiast przykładowe wyniki z badań niszczących (przyrost ciśnienia w czasie) przedstawiono poniżej.



Rys. 5.8. Zmiana ciśnienia w trakcie badań niszczących (ciśnienie niszczące 1428 bar) [136].

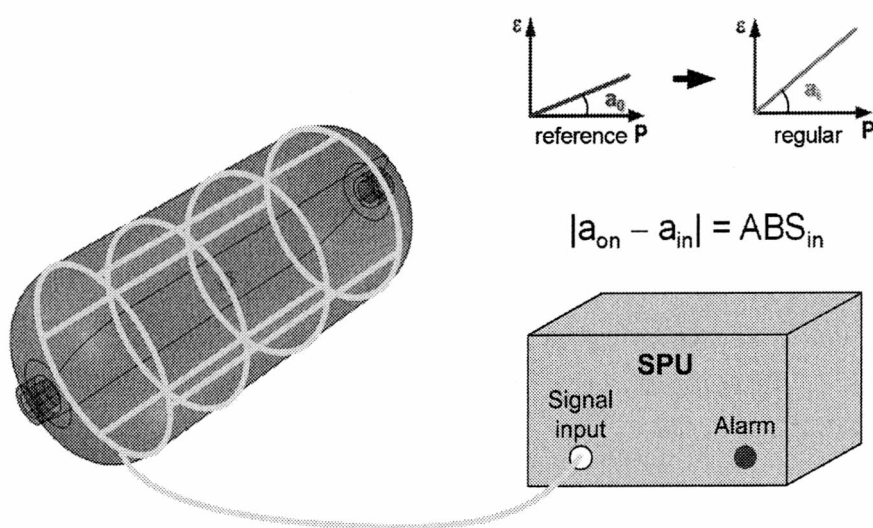
5.3 Koncepcja systemu monitorowania zbiorników wysokociśnieniowych

Proces monitorowania wysokociśnieniowego zbiornika w trybie rzeczywistym (ang.: on-line) nie sprowadza się tylko i wyłącznie do pomiarów parametrów mechanicznych (np. pól odkształceń) jego kompozytowej warstwy nośnej. W celu określenia jego stanu technicznego oraz wykrycia krytycznych defektów, które mogą zagrozić bezpieczeństwu

użytkowników, konieczne jest zastosowanie odpowiednich algorytmów, które umożliwią przeprowadzenie analizy uzyskanych danych pomiarowych.

Idealnym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie metody hybrydowej, w której uzyskane dane pomiarowe porównywane są z modelem numerycznym monitorowanego obiektu. Ponadto „dobry” model numeryczny powinien wskazać miejsca lokalizacji czujników. Jednakże nie zawsze takie podejście jest możliwe. Najczęściej wynika to z braku wystarczających informacji, które umożliwią stworzenie wiarygodnego modelu numerycznego badanego obiektu. Ponadto zastosowanie metody hybrydowej wymusza stosowanie odrębnych modeli numerycznych dla każdego typu zbiornika. Jakakolwiek zmiana w konstrukcji musi zostać odpowiednio uwzględniona w procesie modelowania.

W realizowanej pracy zaproponowano, aby dla obiektów, dla których nie ma dokładnych informacji o geometrii oplotu nośnego, czy też zastosowanych materiałach², zastosować metodę polegającą na analizie lokalnych zmian pola odkształceń (mierzonych w wielu miejscach) w czasie eksploatacji zbiornika i ich wzajemnym porównywaniu dla określonych wartości ciśnienia. Jakiegokolwiek odchylenia, od zakładanego jednorodnego rozkładu pola odkształceń w części cylindrycznej zbiornika, pokazują jego potencjalne uszkodzenia [137].



Rys. 5.9. Koncepcja systemu monitorującego dla wysokociśnieniowego zbiornika.

W celu stworzenia w pełni funkcjonalnego systemu ciągłego monitorowania wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych wyznaczany został „sztuczny” współczynnik

² Brak szczegółowych informacji dotyczących zbiorników był wynikiem polityki handlowej producentów zbiorników i dostarczanie przez nich gotowych produktów do badań bez szczegółowej dokumentacji technicznej.

(określany jako ABS) i porównywany co do wartości z poziomem alarmowym (ang.: threshold). Wartość współczynnika ABS określana była jako wartość bezwzględna z różnicy współczynników kierunkowych prostych odkształcenie-ciśnienie, dla kolejnych cykli obciążeń zbiornika. Ponadto w celu lokalizacji ewentualnych defektów wartości współczynników ABS porównywane były pomiędzy poszczególnymi miejscami pomiarowymi (czujnikami). Dla zbiornika, w którym nie występują żadne defekty, zależności pomiędzy poszczególnymi czujnikami powinny być takie same lub bardzo podobne (ze względu na jednorodny stan odkształceń warstwy nośnej). W przypadku pojawienia się uszkodzenia (np. delaminacja, pęknięcie) pole odkształceń przestaje być jednorodne, a zależności pomiędzy czujnikami zostaną zaburzone [104]. Koncepcja systemu monitorowania zbiorników wysokociśnieniowych przedstawiona została powyżej (Rys. 5.9).

5.4 Badania eksperymentalne zbiorników wysokociśnieniowych

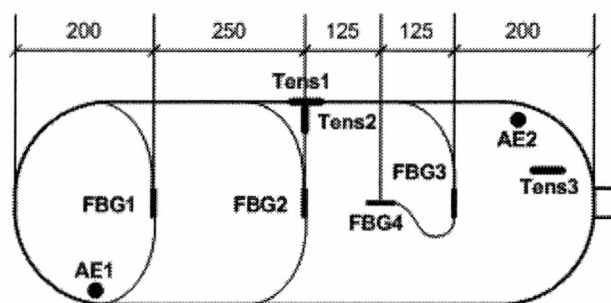
Eksperymentalne badania ciśnieniowe zbiorników kompozytowych zostały zrealizowane w Laboratorium Zbiorników Wysokociśnieniowych w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, w ramach realizacji projektów: StorHy (Storage of Hydrogen, 6-ty Program Ramowy Unii Europejskiej) oraz InGAS (Integrating GAS Powertrain. Low emissions, CO₂ optimised and efficient CNG engines for passenger cars and light duty vehicles, 7-my PR UE), a także projektów krajowych: „Wykorzystanie nanotechnologii w nowoczesnych materiałach” (nr projektu POIG 01.01.02-02-002/08) oraz „Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii” (Projekt kluczowy nr POIG.01.01.02-00-016/08), finansowanych ze środków UE w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Badanymi obiektami były komercyjne zbiorniki udostępnione przez firmy: Dynatek, Ullit, Faber oraz Xperion. Ponadto część badań została przeprowadzona na zbiornikach wykonanych w IMMT PWr, bądź też w kooperacji IMMT z Uniwersytetem Technicznym w Dreźnie (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden).

5.4.1 Badania cykliczne zbiornika wysokociśnieniowego

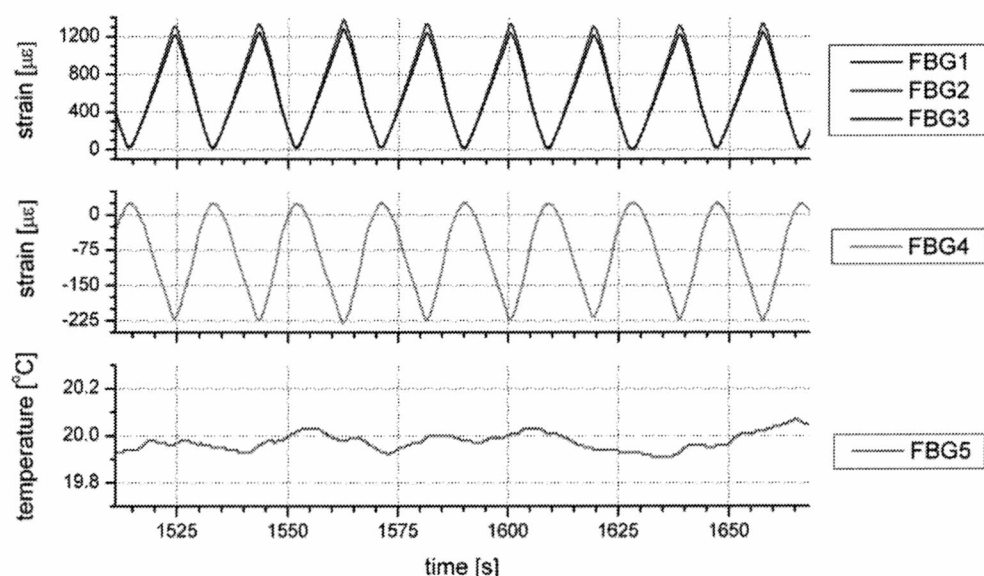
Badania cykliczne w temperaturze pokojowej dla wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego z linerem stalowym, przeznaczonym do gromadzenia wodoru zrealizowano zgodnie z regulacją [2]. Zbiornik obciążano w maksymalnym przedziale ciśnień od 20 do 875 barów przy użyciu stanowiska opisanego w punkcie 5.2.1. W celu monitorowania stanu technicznego zbiornika zastosowane zostały dwa rodzaje czujników przeznaczonych do lokalnych pomiarów odkształceń: światłowodowe siatki Bragga oraz tensometry rezystancyjne. Dodatkowo zastosowane zostały czujniki emisji akustycznej [138]. W układzie pomiarowym zastosowane zostały urządzenia pomiarowe firm: Institut für

Photonische Technologien - IPHT (pomiar FBG), Hottinger Baldwin Messtechnik - HBM (pomiar tensometryczny) oraz Vallen Systeme (emisja akustyczna). Rozmieszczenie czujników na badanym zbiorniku przedstawiono poniżej (Rys. 5.10).



Rys. 5.10. Rozmieszczenie czujników na badanym zbiorniku ciśnieniowym typu 3-go [124].

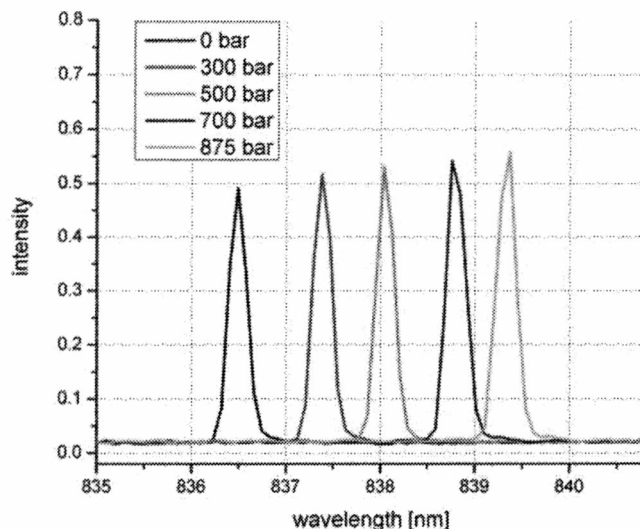
Odształcenia w kierunku obwodowym monitorowane były przez trzy światłowodowe siatki Bragga (oznaczone jako: FBG1, FBG2 oraz FBG3) a także tensometr (Tens2). Ponadto rejestrowano także odkształcenia wzdłużne na części walcowej zbiornika (FBG4 oraz Tens1) oraz dennicy (Tens3). Czujnik oznaczony jako FBG5 (nie zaznaczony na rysunku) przeznaczony był do kompensacji wpływu temperatury.



Rys. 5.11. Odształcenia zbiornika oraz zmiana temperatury w trakcie próbnych obciążeń cyklicznych w zakresie ciśnień: 20÷300 barów.

Początkowo zbiornik obciążano cyklicznie ciśnieniem próbnym w zakresie ciśnień 20÷300 barów. Zarejestrowane przez czujniki FBG zmiany odkształceń (FBG1÷FBG4) oraz pomiar temperatury (FBG5) przedstawiono na Rys. 5.11. Zauważyć należy, iż czujniki zainstalowane obwodowo ulegały rozciąganiu (dodatnie wartości rejestrowanych odkształceń), natomiast czujniki wzdłużne – ściskaniu (ujemne wartości rejestrowanych

odkształceń). Ponadto pomiar temperatury na powierzchni zbiornika wykazał jej niewielkie zmiany ($0,2 \div 0,4^{\circ}\text{C}$).

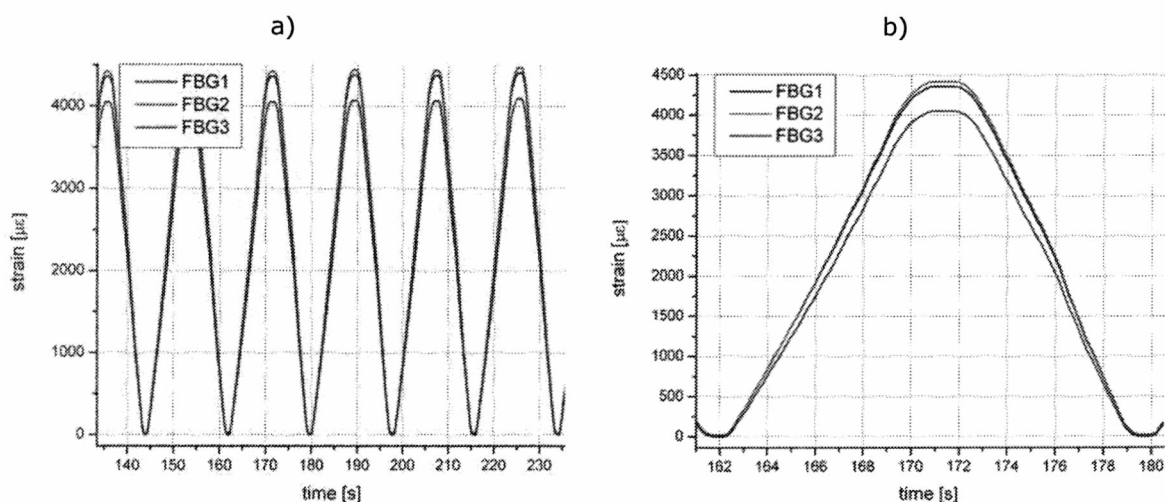


Rys. 5.12. Zmiana długości fali Bragga zarejestrowana przez czujnik FBG1, dla różnych wartości ciśnień wewnętrznych.

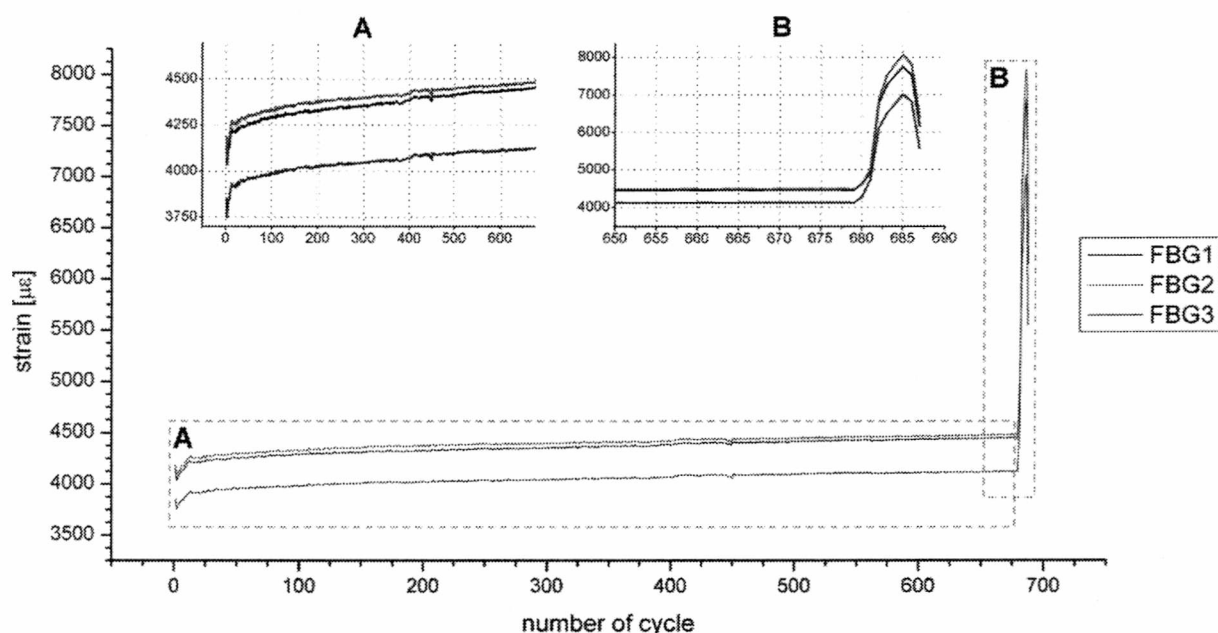
W trakcie obciążania próbnego w wyższym zakresie ciśnień uszkodzeniu uległ światłowód pomiędzy czujnikami FBG3 oraz FBG4. Ponieważ zainstalowane czujniki były w konfiguracji szeregowej (pięć czujników FBG „zapisanych” kolejno w jednym światłowodzie), uniemożliwiło to rejestrację odkształceń wzdłużnych oraz temperatury w dalszych badaniach, jednak równocześnie nie wpłynęło to w żadnym stopniu na pomiary odkształceń obwodowych przez czujniki FBG1÷FBG3, które były kontynuowane.

Na rysunku powyżej (Rys. 5.12) przedstawiona została zmiana długości fali Bragga, zarejestrowana przez zainstalowany w kierunku obwodowym czujnik FBG1, w zakresie ciśnień od 0 do 875 bar. Wraz ze wzrostem ciśnienia wewnętrznego widoczne jest przesunięcie fali Bragga w stronę wyższych wartości, co wynika z odkształcania czujnika światłowodowego w kierunku rozciągającym (zmian okresu Λ siatki Bragga oraz zmiana współczynnika załamania).

W trakcie badań właściwych ($20 \div 875$ barów) wykonano około 700 cykli symulujących pracę zbiornika (tankowanie – opróżnianie). Na wykresie zamieszczonym na Rys. 5.13 przedstawiono przykładowe odkształcenia obwodowe zbiornika w trakcie cyklicznego obciążania zarejestrowane przez siatki FBG1, FBG2 oraz FBG3. Należy zauważyć, iż odkształcenia obwodowe zbiornika kompozytowego dla ciśnienia 875 barów, przyjmują stosunkowo duże wartości (od ~ 4000 do $\sim 4500 \mu\epsilon$, w zależności od lokalizacji czujnika), co jest wynikiem obciążania zbiornika wysokim ciśnieniem wewnętrznym [139].



Rys. 5.13. Charakterystyka odkształceń obwodowych mierzona przez światłowodowe siatki Bragga w różnych punktach zbiornika: widok ogólny (a) oraz szczegółowy dla wybranego cyklu (b).

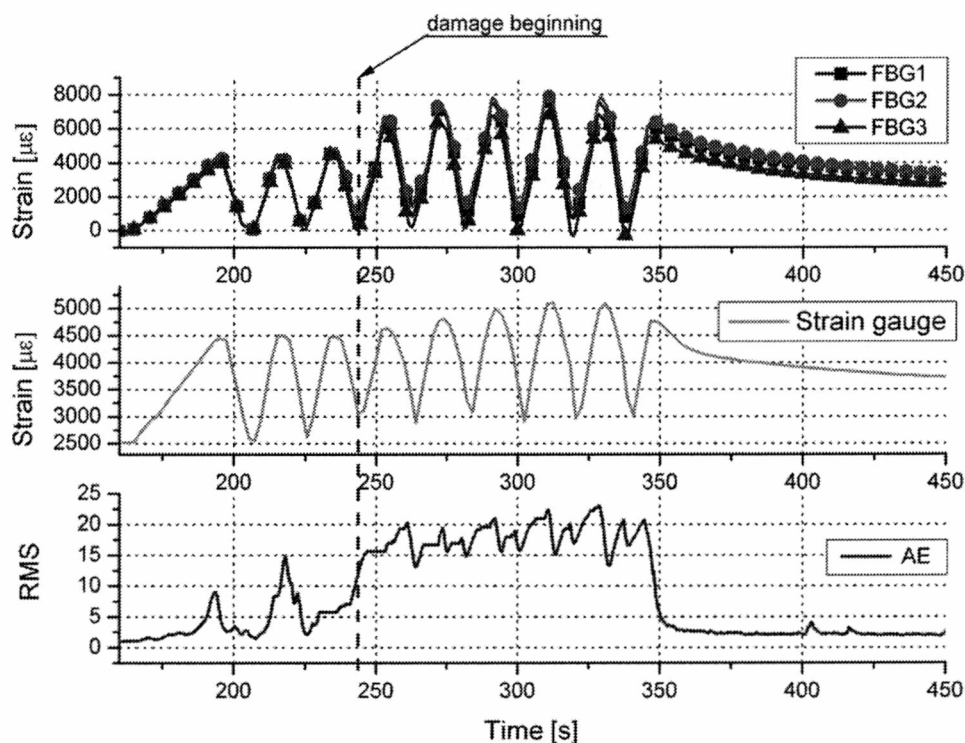


Rys. 5.14. Zmiana maksymalnych odkształceń obwodowych (dla $P = 875$ bar) w funkcji liczby cykli obciążeń testowego zbiornika (wraz z powiększeniem zaznaczonych obszarów).

Na Rys. 5.14 przedstawione zostały odkształcenia maksymalne (dla ciśnienia wewnętrznego $P_{\max}=875$ bar), zarejestrowane przez czujniki FBG, zainstalowane w kierunku obwodowym, w funkcji liczby cykli obciążeń zbiornika. Należy zauważyć, iż wzrost liczby cykli wywołuje wzrost rejestrowanych lokalnie wartości odkształceń (powiększony fragment „A” na Rys. 5.14), aż do nagłego zniszczenia badanego zbiornika (powiększony fragment „B” na Rys. 5.14). Świadczy to o degradacji struktury nośnej badanego zbiornika i wystąpieniu zjawiska określanego w literaturze związanej z materiałami kompozytowymi jako ang. „sudden death” (np.: [140, 141]). Zbliżone rezultaty degradacji ma-

teriału kompozytowego otrzymano dla próbek NOL poddanych stałemu obciążeniu (próba na pełzanie, opisana szerzej w Rozdziale 4).

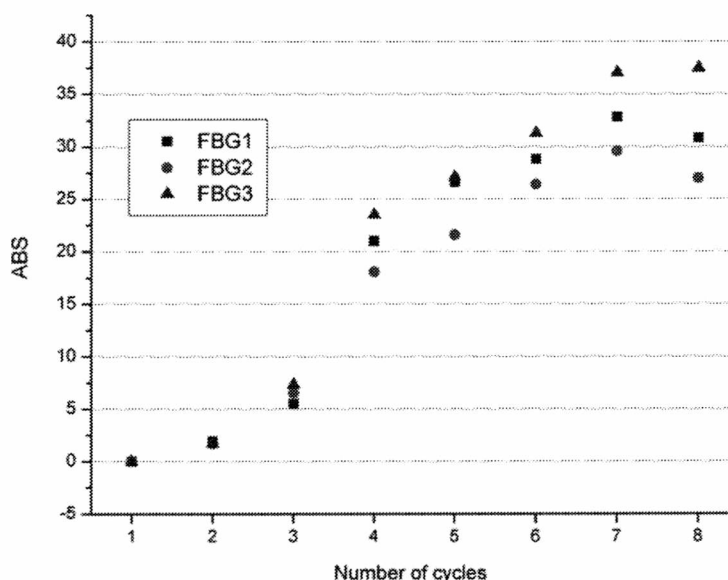
Dla badanego zbiornika uszkodzenie związane jest ponadto z efektem zmęczenia stali, z której wykonany został liner (tzw. cyclic softening). Sam efekt rozszczelnienia zbiornika poprzedzony został gwałtownym wzrostem rejestrowanych lokalnie odkształceń obwodowych (powiększony fragment „B” na Rys. 5.14). Analiza nachylenia krzywej „odkształcenie – liczba cykli”, w jej liniowym obszarze, umożliwia określenie czasu bezpiecznego użytkowania zbiornika, czyli przewidywania jego żywotności. Ma to szczególne znaczenie w trakcie użytkowania wysokociśnieniowych zbiorników.



Rys. 5.15. Lokalne odkształcenia obwodowe zbiornika rejestrowane przez czujniki FBG (wykres górny) oraz tensometryczne (wykres środkowy), a także sygnał z emisji akustycznej (wykres dolny) w momencie uszkodzenia [139].

Na rysunku Rys. 5.15 zestawione zostały sygnały, zarejestrowane przez poszczególne czujniki (obwodowe FBG oraz tensometr, a także EA), w chwili uszkodzenia zbiornika (linia przerywana na Rys. 5.15). Wyraźnie widać, iż moment uszkodzenia został poprzedzony wspomnianym wcześniej gwałtownym wzrostem rejestrowanych odkształceń w kierunku obwodowym (rzędu $1500 \div 3000 \mu\epsilon$, w zależności od czujnika i jego odległości od defektu). Ponadto występuje duża korelacja pomiędzy pomiarami zmiany pola odkształceń powierzchni zewnętrznej zbiornika, a sygnałami akustycznymi rejestrowanymi przez czujniki emisji akustycznej. W chwili uszkodzenia następuje znaczący wzrost sygnału RMS, świadczący o wysokim stopniu uszkodzeń warstwy kompozytowej [139].

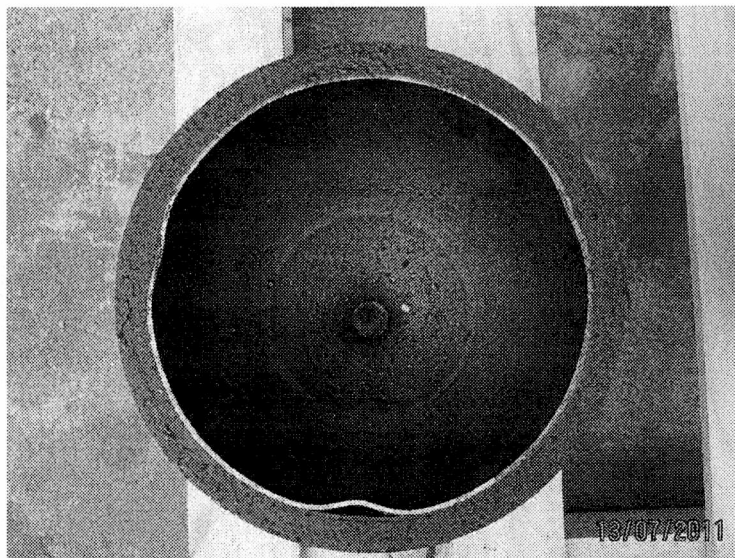
Na rysunku poniżej (Rys. 5.16) przedstawiona została analiza lokalnych odkształceń obwodowych dla ośmiu ostatnich cykli z badań cyklicznych zbiornika wysokociśnieniowego. Analiza została przeprowadzona zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 5.3, polegającą na wyznaczeniu „sztucznego” współczynnika ABS, wyznaczanego jako różnica współczynników kierunkowych dla prostych „odkształcenie – ciśnienie”, wyznaczonych w pomiarze referencyjnym oraz kolejnych. Jako punkt referencyjny przyjęty został pierwszy z analizowanych pomiarów. Na Rys. 5.16 widoczny jest wyraźny skok wartości współczynników ABS, pomiędzy cyklami nr 3 oraz 4, dla wszystkich analizowanych punktów pomiarowych. Ponadto można zauważyć wzrost różnic pomiędzy poszczególnymi wartościami współczynników ABS, świadczący o niejednorodnym rozkładzie pola odkształceń na powierzchni zewnętrznej zbiornika. Taka sytuacja wskazuje na silny rozwój defektów w strukturze nośnej kompozytowego zbiornika wysokociśnieniowego oraz w stalowym linerze.



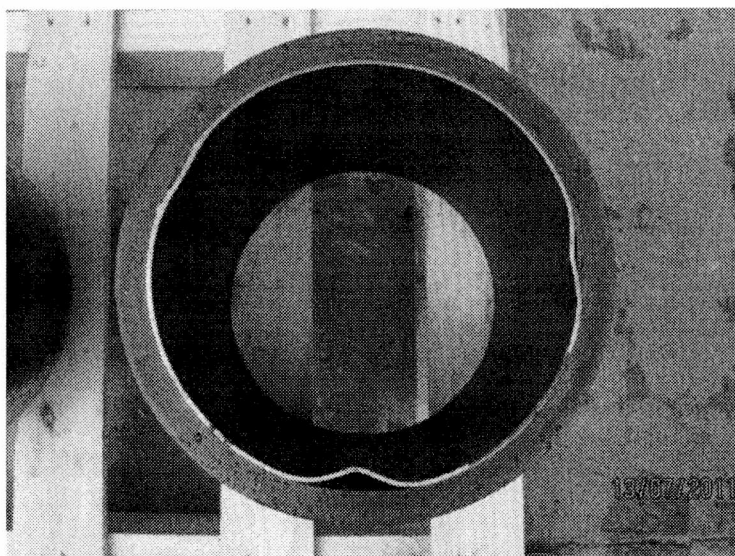
Rys. 5.16. Analiza uzyskanych wyników pomiarowych dla ostatnich cykli obciążeń zbiornika (detekcja defektów w konstrukcji zbiornika wysokociśnieniowego).

Po przeprowadzonych badaniach cyklicznych, testowy zbiornik typu 3-go został przecięty na trzy części (2 dennice oraz część cylindryczną) celem oględzin defektów powstałych w jego strukturze. Na Rys. 5.17 przedstawione zostały jego zdjęcia. Można na nich zauważyć widoczne efekty zmęczeniowego uszkodzenia struktury stalowego lineru wraz z rozwiniętą szczeliną zmęczeniową, przez którą w ostatnich kilku cyklach wydobywało się medium robocze (Rys. 5.18).

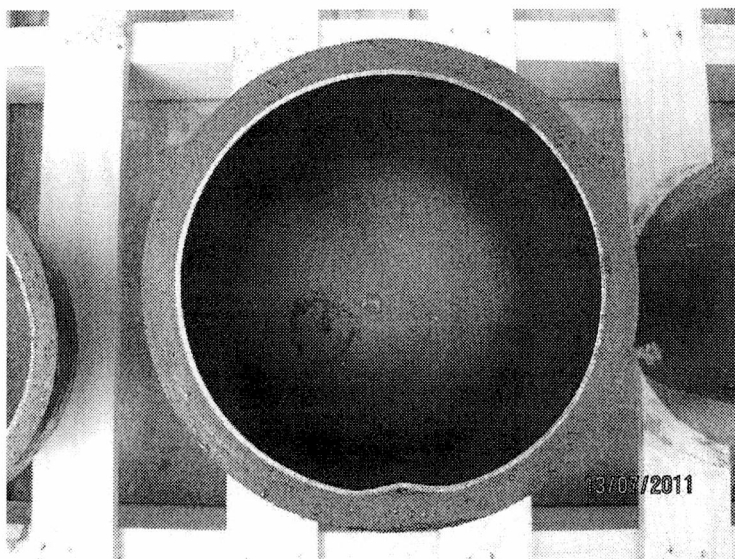
a)



b)



c)



Rys. 5.17. Uszkodzenia zbiornika typu 3-go, po przeprowadzonej serii badań cyklicznych.

Przeprowadzone *post factum* analizy wykazały, iż zainstalowane na jednej z tworzących czujniki FBG znajdowały się niemal po przeciwnej stronie powstałego defektu, czyli w najmniej korzystnym miejscu z punktu widzenia lokalizacji punktów pomiarowych w systemach SHM. Pomimo tego zarejestrowane w trakcie badań cyklicznych zmiany lokalnych odkształceń, pozwoliły na wykrycie defektu przed całkowitym uszkodzeniem zbiornika oraz zaobserwowanie wzrostu stopnia degradacji całej konstrukcji.



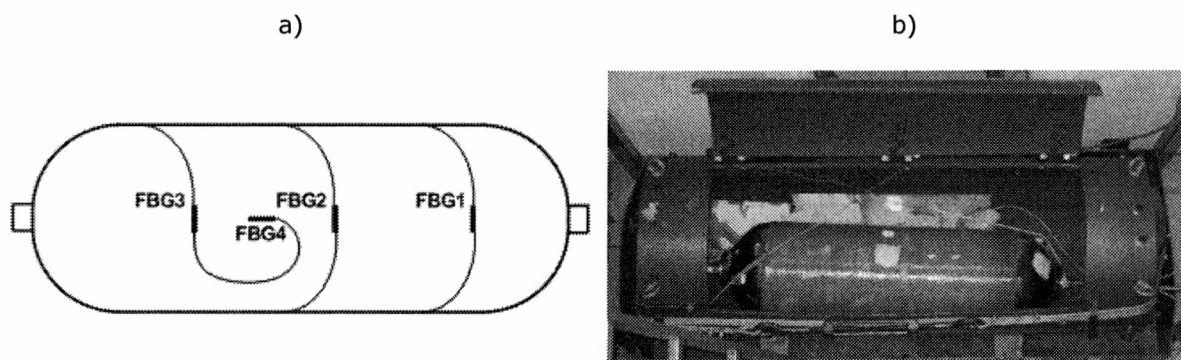
Rys. 5.18. Szczelina zmęczeniowa w stalowym linerze uszkodzonego testowego zbiornika typu 3-go, po przeprowadzonej serii badań cyklicznych.

5.4.2 Badania statyczne zbiornika wysokociśnieniowego

Badania statyczne (próba niszcząca, ang. burst test) zostały zrealizowane dla wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych z linerem metalowym (typ 3.) oraz polimerowym (typ 4.), przeznaczonych do gromadzenia wodoru oraz CNG, zgodnie z odpowiednimi regulacjami [2, 4]. Zbiorniki obciążano od ciśnienia 0 barów aż do jego rozerwania, przy użyciu stanowiska hydraulicznego opisanego w punkcie 5.2.2. W celu monitorowania stanu technicznego zbiorników zastosowane zostały lokalne czujniki odkształceń w postaci światłowodowych siatek Bragga, a w układzie pomiarowym zastosowane zostało urządzenia pomiarowe firmy IPHT.

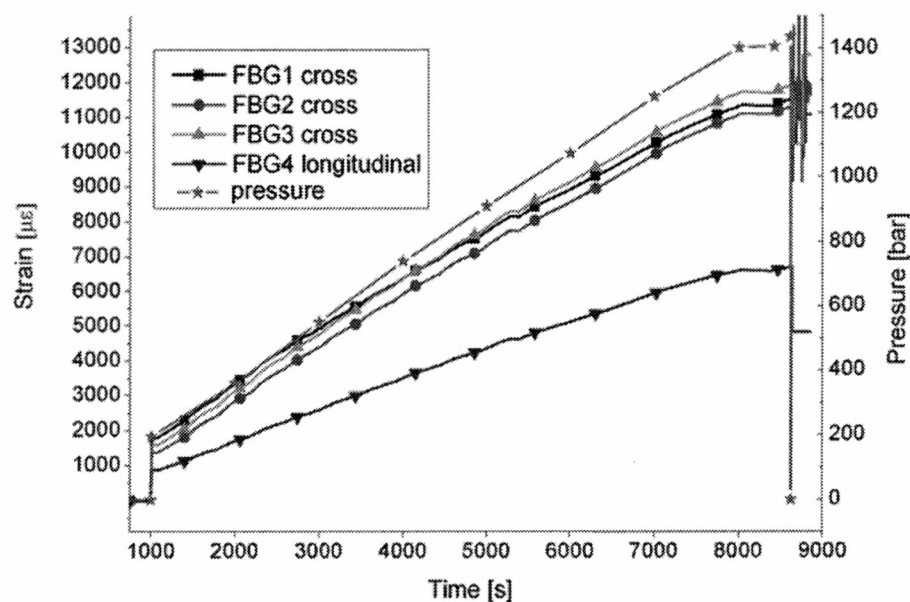
Podobnie, jak w przypadku badań cyklicznych zbiornika typu 4-go, czujniki naklejone zostały na warstwie włókna szklanego, która była nawinięta na obszarze cylindrycznym zbiornika w końcowej fazie produkcji. Rozmieszczenie czujników na badanym zbiorniku oraz widok zbiornika przed próbą niszczącą przedstawiono powyżej na Rys. 5.19).

Odształcenia w kierunku obwodowym monitorowane były przez trzy światłowodowe siatki Bragga (oznaczone jako: FBG1, FBG2 oraz FBG3), natomiast odkształcenia wzdłużne, na części walcowej zbiornika, przez czujnik oznaczony FBG4.



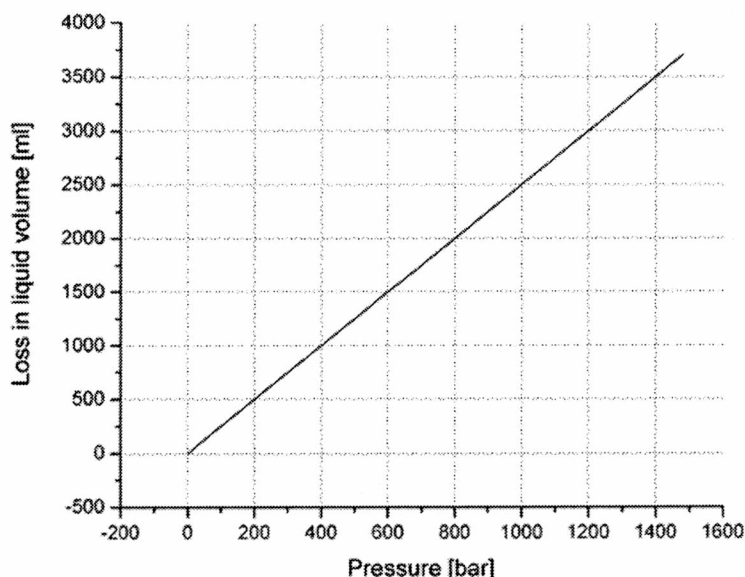
Rys. 5.19. Rozmieszczenie czujników na zbiorniku ciśnieniowym poddanym próbie niszczącej (a) oraz widok zbiornika w komorze bezpieczeństwa przed badaniami (b).

Poniżej na Rys. 5.20 przedstawione zostały wyniki uzyskane w trakcie próby niszczącej dla zbiornika węglowego z linerem polimerowym, dla którego ciśnienie niszczące osiągnęło wartość 1428 barów. Wykres zamieszczony na Rys. 5.20 przedstawia lokalne odkształcenia zbiornika oraz zmianę ciśnienia wewnętrznego w zbiorniku. Należy zauważyć, iż wraz ze wzrostem czasu trwania eksperymentu, czyli wraz ze wzrostem ciśnienia od 0 aż do rozerwania (1428 barów), następuje wzrost wartości mierzonych odkształceń. Maksymalne odkształcenia obwodowe wynosiły ok. 1,1%, a wzdłużne 0,65%. Można zauważyć także, że nachylenie krzywej pomiarowej, wyznaczonej z czujnika FBG3, zmienia się. Jest to prawdopodobnie związane z lokalną zmianą podatności zbiornika na odkształcenie i występowaniem lokalnego defektu [136].



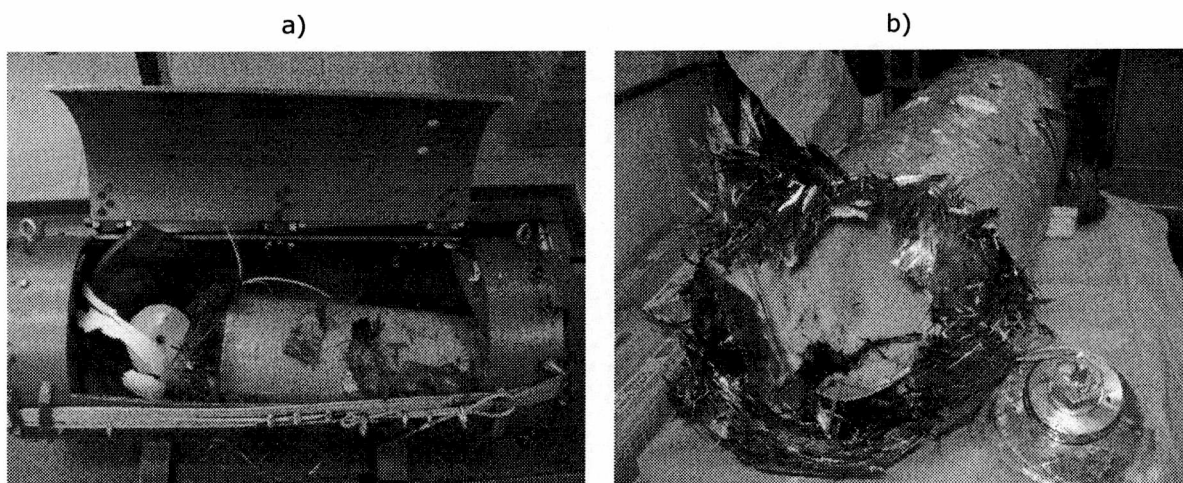
Rys. 5.20. Zmiana ciśnienia oraz lokalne odkształcenia zbiornika typu 4-go w trakcie badań niszczących ($P_{\max} = 1428$ barów).

W trakcie badań niszczących wyznaczona została zmiana objętości zbiornika pod wpływem ciśnienia wewnętrznego. Uzyskane rezultaty przedstawione zostały na Rys. 5.21. Zmiana objętości zbiornika wyrażona została przez objętość cieczy roboczej (wody) wtłoczonej do zbiornika w trakcie próby niszczącej. Należy zauważyć, iż dla badanego zbiornika zmiana jego objętości, pod wpływem wzrostu, ciśnienia ma charakter liniowy, a współczynnik rozszerzalności objętościowej zbiornika wynosi 0,0025 l/bar.



Rys. 5.21. Zmiana objętości cieczy wtłoczonej do zbiornika w trakcie próby niszczącej, w funkcji ciśnienia wewnętrznego ($P_{\max} = 1428$ bar).

Na Rys. 5.22 przedstawiono zdjęcia rozerwanego zbiornika po przeprowadzonych badaniach niszczących. Widoczne jest rozerwanie zbiornika w okolicach jednej z dennic, w okolicach której zlokalizowany był czujnik FBG3.



Rys. 5.22. Widok zbiornika po badaniach niszczących.

Podstawowym celem powyższych badań było sprawdzenie przydatności czujników światłowodowych w postaci światłowodowych siatek Bragga (FBG) do pomiarów odkształceń wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych, dla których wartości lokalnych odkształceń powierzchniowych sięgają $1 \div 2$ % [139].

5.5 Badania statyczne i cykliczne zbiorników z programowanymi defektami

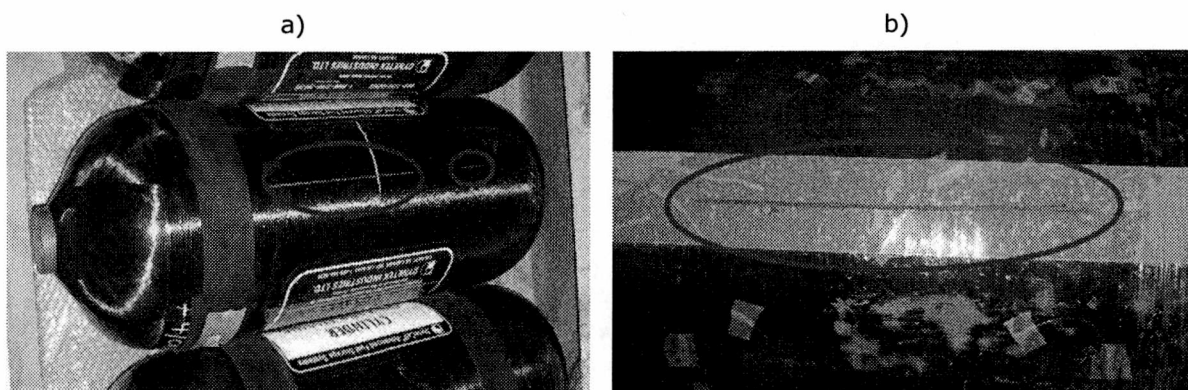
Istotnym problemem w monitorowaniu konstrukcji kompozytowych jest wykrywanie i identyfikacja defektów powstających w strukturze materiału w ich wczesnym stadium. Uszkodzenia te mogą być następstwem zmęczenia materiału na skutek obciążeń cyklicznych (np. w przypadku tankowania i „roztankowania” zbiornika), bądź też innych zdarzeń, na przykład zewnętrznych uderzeń, czy też przekroczenia dopuszczalnych wartości naprężeń (ciśnień) i temperatury pracy.

Normy badania zbiorników przeznaczonych, do gromadzenia wysokosprężonych paliw [2, 4, 129], klasyfikują dwa podstawowe typy defektów. Są to nacięcia (ang.: flaw) oraz delaminacje (ang.: delamination). Zgodnie z cytowanymi regulacjami, zbiornik z istniejącym defektem powinien spełnić wymagania m.in. badań cyklicznych w temperaturze pokojowej dla zbiornika bez widocznych defektów.

5.5.1 Defekty programowane – nacięcia

Badania zbiorników z nacięciami są określane w normach mianem ang.: „Composite flaw tolerance test” i są przeprowadzane dla zbiorników 2-giej, 3-ciej oraz 4-tej generacji. W zależności od przyjętych norm, rozmiar defektu może być określony jako „większy niż limit dla wizualnej inspekcji określony przez producenta zbiornika”, a zarazem nie mniejszy niż:

- 25mm długości x 1.25mm głębokości,
- 200mm długości x 0.75mm głębokości.



Rys. 5.23. Zbiorniki kompozytowe z defektami programowanymi w postaci nacięć.

Nacięcia wykonane są w powłoce kompozytowej zbiornika w kierunku równoległym do jego osi głównej. Jak już wspomniano wcześniej, po wykonaniu defektów, zbiornik powinien zostać poddany standardowej próbie cyklicznej (opisanej w 5.2.1), której wynik zostanie uznany za pozytywny, jeżeli zbiornik w trakcie badań nie ulegnie zniszczeniu (rozszerzenie lub rozerwanie). Niektóre normy dopuszczają możliwość rozszerzenia zbiornika, po przekroczeniu odpowiedniej liczby cykli (np. 3000 dla [2, 4]). Na Rys. 5.23 przedstawione zostały przykładowe zbiorniki typu 3-go z programowanymi defektami, wykonanymi w postaci nacięć w kompozytowej warstwie nośnej.

5.5.2 Defekty programowane – delaminacje

Defekty w postaci delaminacji warstwy kompozytowej zbiornika, w obecnie stosowanych normach, nie są opisane wprost. Ich wpływ na żywotność konstrukcji jest badany w trakcie realizacji próby zrzutowej.

Procedura próby zrzutowej badania kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych (ang.: impact damage test) zakłada poddanie próbie co najmniej jednego zbiornika, który nie jest obciążony ciśnieniem wewnętrznym oraz nie ma zainstalowanych zaworów. Testowy zbiornik powinien zostać zrzucony na płaską, twardą powierzchnię (np. betonową) zgodnie z procedurą:

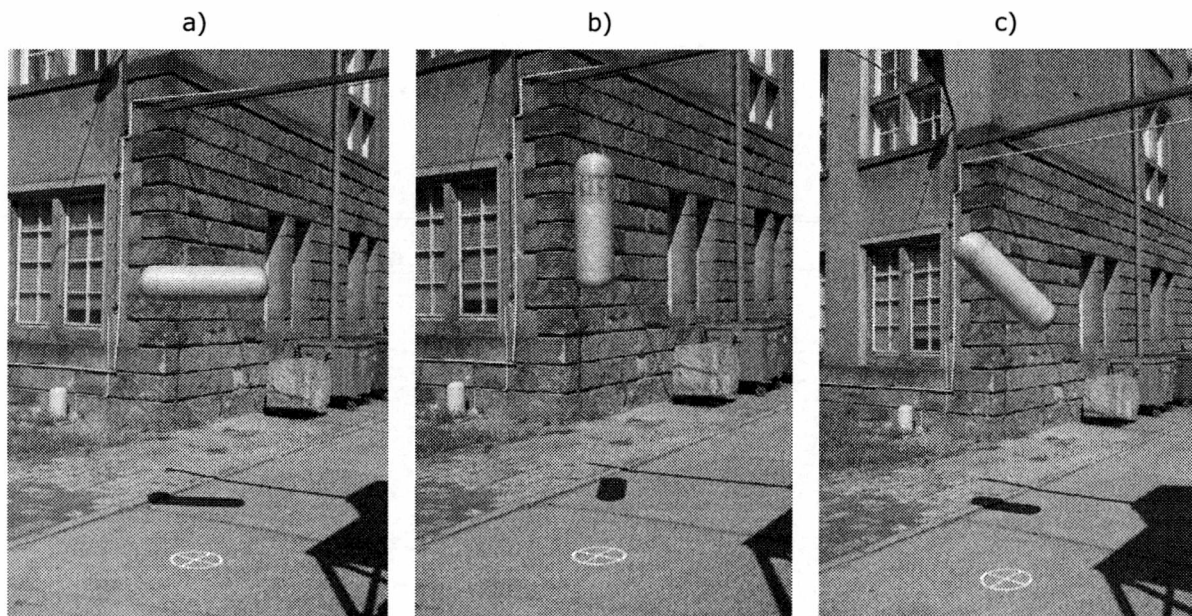
- w pozycji poziomej, dno zbiornika znajduje się 1,8m ponad powierzchnią (Rys. 5.24a),
- w pozycji pionowej na każdą z dennic z wysokości odpowiadającej energii potencjalnej 488J, ale nie większej niż 1,8m ponad powierzchnią (Rys. 5.24b),
- pod kątem 45° do powierzchni z wysokości, dla której środek ciężkości zbiornika znajduje się 1,8m ponad powierzchnią (Rys. 5.24c).

W zależności od normy, wg. której realizowana jest próba, dopuszcza się przeprowadzenie zrzutów na jednym bądź trzech różnych zbiornikach.

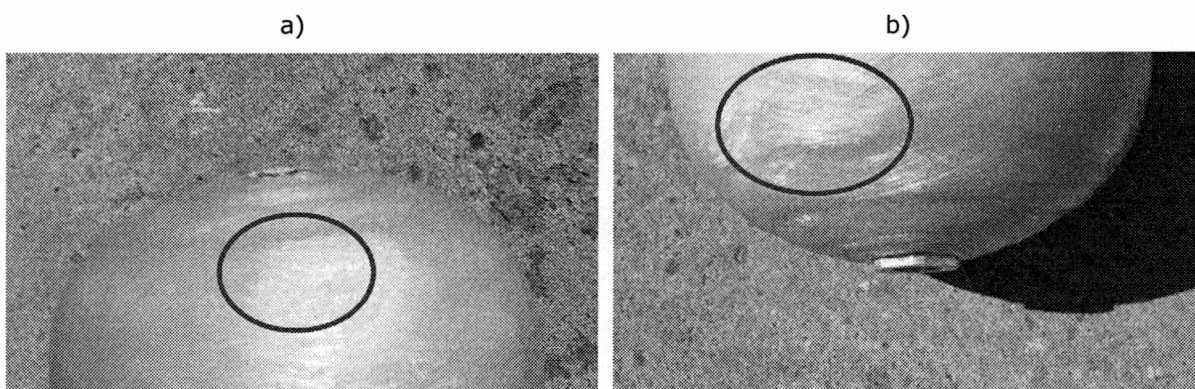
Po próbach zrzutowych zbiornik powinien zostać poddany standardowej próbie cyklicznej w temperaturze pokojowej (opisanej w 5.2.1). Podobnie jak w przypadku badań zbiorników z defektami w postaci nacięć, wynik próby zostanie uznany za pozytywny, jeżeli zbiornik w trakcie badań nie ulegnie zniszczeniu (rozszerzenie lub rozerwanie). Niektóre normy dopuszczają możliwość rozszerzenia zbiornika, po przekroczeniu odpowiedniej liczby cykli (np. 3000 dla [2, 4]).

Na Rys. 5.25 pokazano dwie dennice tego samego zbiornika (typu 4-go, z linerem polimerowym) po przeprowadzonej próbie zrzutowej. Należy zauważyć, iż obydwa króćce przemieściły się w głąb zbiornika, powodując prawdopodobnie uszkodzenia na łączeniu aluminiowej zapraski króćca ze ścianką lineru. Ponadto widoczne są obtarcia i lokalne

delaminacje w obszarze kompozytowej warstwy nośnej, która miała bezpośredni kontakt z podłożem przy pierwszym uderzeniu lub po odbiciu.



Rys. 5.24. Próba zrzutowa zbiorników kompozytowych.



Rys. 5.25. Zbiornik kompozytowy typu 4-go po próbie zrzutowej z zaznaczonymi miejscami uszkodzeń w warstwie kompozytowej.

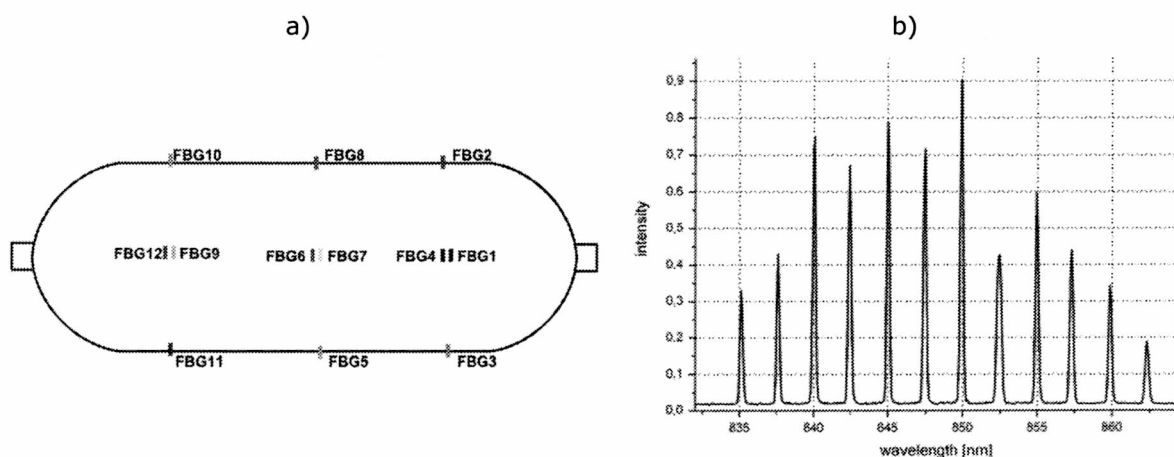
5.5.3 Badania statyczne zbiorników z defektami programowanymi

W kolejnym etapie badań podjęto próbę identyfikacji wpływu defektów, powstających w trakcie normalnego użytkowania kompozytowego zbiornika wysokociśnieniowego oraz określenie stanu technicznego konstrukcji, na podstawie analizy odpowiedzi czujników światłowodowych, naklejonych na kompozytowej warstwie wzmacniającej.

W celu sprawdzenia koncepcji monitorowania zbiorników wysokociśnieniowych (opisanej w podrozdziale 5.3) z wykorzystaniem czujników światłowodowych, zastosowane zostały zbiorniki z opisanymi powyżej programowanymi defektami. Zlokalizowane na po-

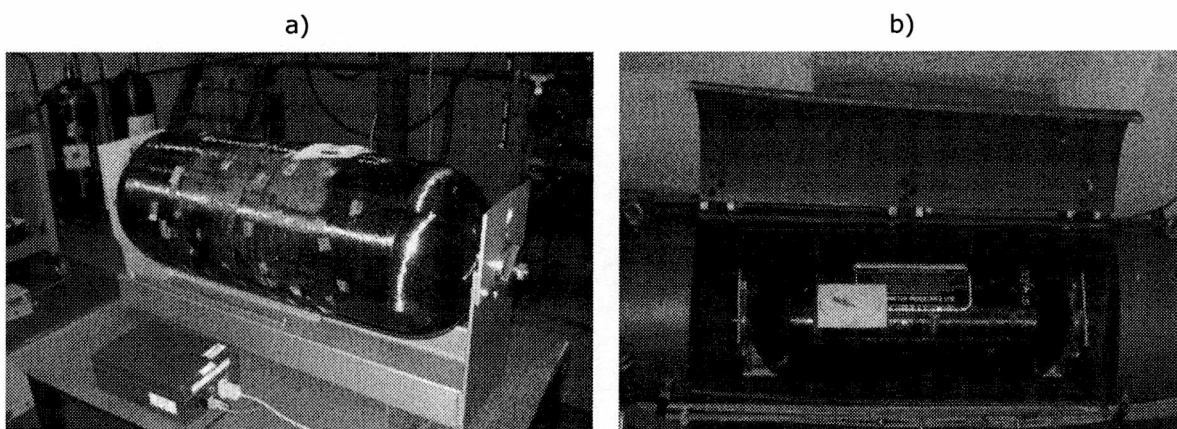
wierzchni zbiorników czujniki identyfikowały lokalne pole odkształceń, którego zmiany wywołane zostały przez wprowadzenie zewnętrznych defektów.

W początkowym etapie badań zastosowane zostały czujniki w postaci światłowodowych siatek Bragga. Zostały one naklejone na warstwie kompozytowej w kierunku obwodowym (prostopadle do osi głównej zbiornika), po cztery czujniki symetrycznie rozmieszczone w trzech różnych przekrojach poprzecznych (Rys. 5.26a). Na rysunku Rys. 5.26b przedstawiono widmo odbiciowe pochodzące od dwunastu czujników FBG, pracujących w zakresie spektralnym od 835 do 862,5 nm.



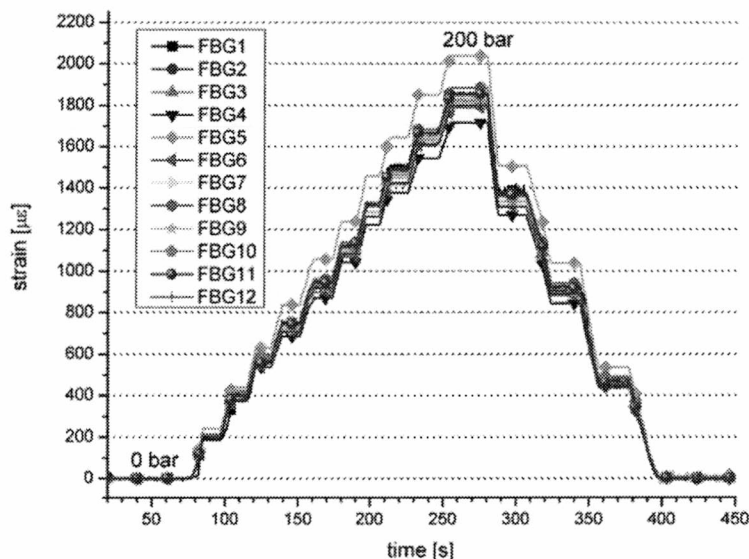
Rys. 5.26. Rozmieszczenie dwunastu światłowodowych siatek Bragga (FBG) na zbiorniku testowym (a) oraz spektrum odbiciowe zainstalowanych czujników (b).

Obiektem testowym był seryjny zbiornik typu 3-go, z linerem aluminiowym oraz opłotem z kompozytu węglowo-epoksydowego, o nominalnym ciśnieniu pracy wynoszącym ~207 bar (3000 psi), produkowany na japoński rynek przez firmę Dynatek i przeznaczony do ciśnieniowego gromadzenia wodoru (Rys. 5.27).



Rys. 5.27. Testowy zbiornik z programowanymi defektami w postaci nacięć oraz zainstalowanymi czujnikami światłowodowymi FBG.

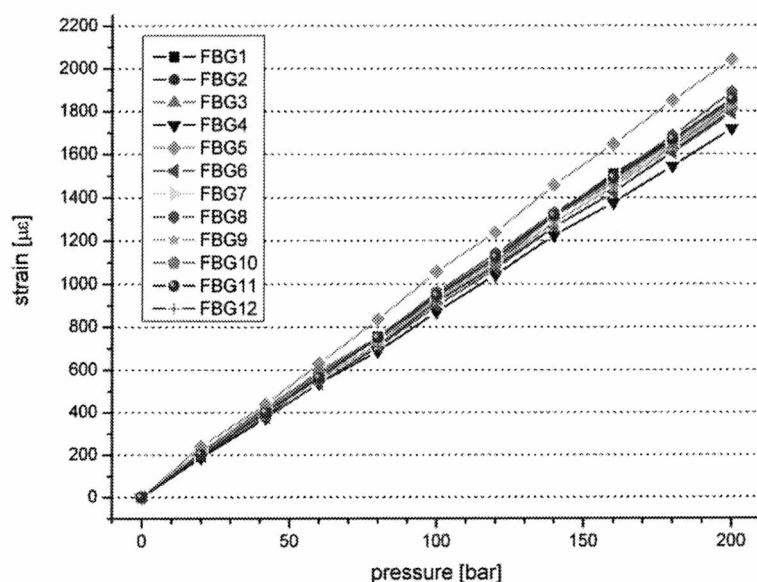
W pierwszym etapie przeprowadzono serię badań, mających na celu określenie lokalnych odkształceń niezdefektowanej warstwy wzmacniającej zbiornika pod wpływem ciśnienia wewnętrznego [139]. Pomiar ten stanowił punkt referencyjny dla dalszych badań zbiornika z defektami.



Rys. 5.28. Lokalne odkształcenia zbiornika testowego mierzone w trakcie statycznej próby ciśnieniowej „step-by-step”.

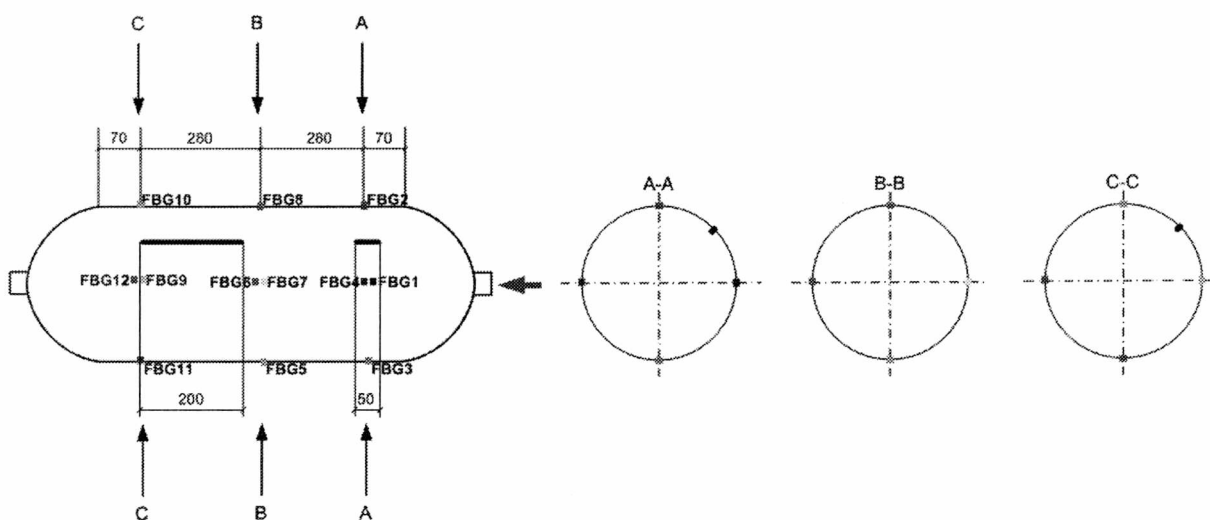
Zbiornik był obciążany statycznie ciśnieniem w zakresie od 0 do 200 bar, w trybie „step-by-step” (czyli przyrost ciśnienia o stałą wartość, z chwilowym wyczekaniem pomiędzy kolejnymi zmianami), w kroku narastającym co 20 barów. Zastosowane zostało stanowisko hydrauliczne przeznaczone do badań niszczących wysokociśnieniowych zbiorników, opisane w punkcie 5.2.2. Zarejestrowane przez światłowodowe siatki Bragga zmiany lokalnych odkształceń obwodowych w funkcji czasu trwania eksperymentu przedstawione zostały powyżej (Rys. 5.28), natomiast w funkcji ciśnienia wewnętrznego poniżej (Rys. 5.29).

Należy zauważyć, iż wzrost mierzonych wartości odkształceń obwodowych jest niemal liniowy. Ponadto odkształcenia rejestrowane przez czujniki oznaczone jako FBG4 oraz FBG5 odbiegają znacząco od odkształceń rejestrowanych przez pozostałe czujniki. Wynika to prawdopodobnie z lokalnych niejednorodności ścianki zbiornika, które wprowadzają niesymetrię w mierzonym polu odkształceń powierzchniowych obiektu testowego [139].



Rys. 5.29. Lokalne odkształcenia obwodowe zbiornika testowego w funkcji ciśnienia wewnętrznego.

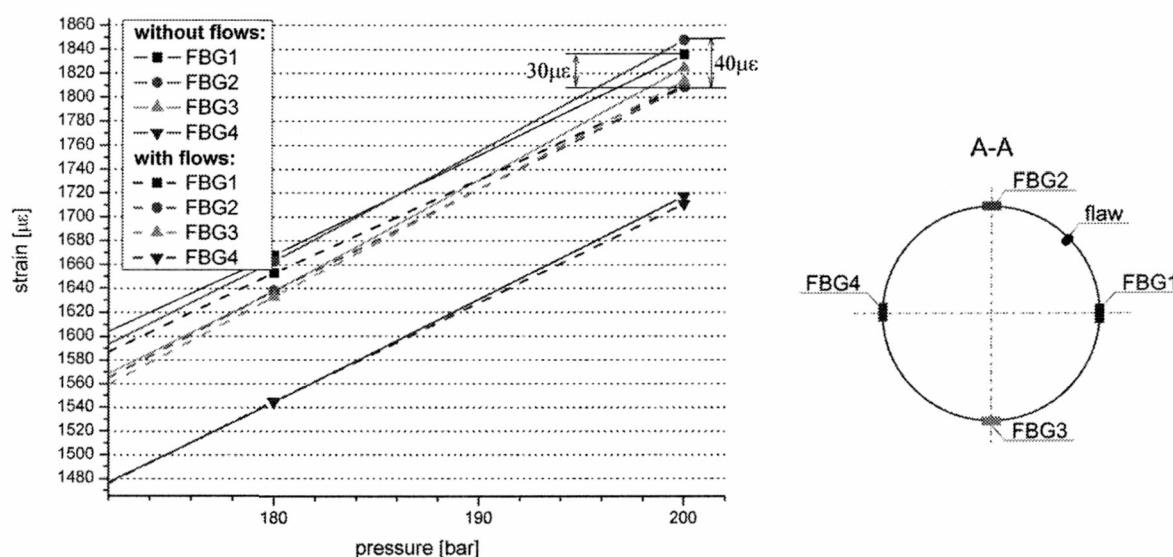
W kolejnym etapie wykonano dwa wzdłużne nacięcia o wymiarach: 200 mm x 1 mm oraz 50 mm x 1 mm (długość x głębokość) oraz 1.2 mm szerokości. Rozmieszczenie programowanych defektów na zbiorniku testowym względem czujników przedstawione zostało na Rys. 5.30.



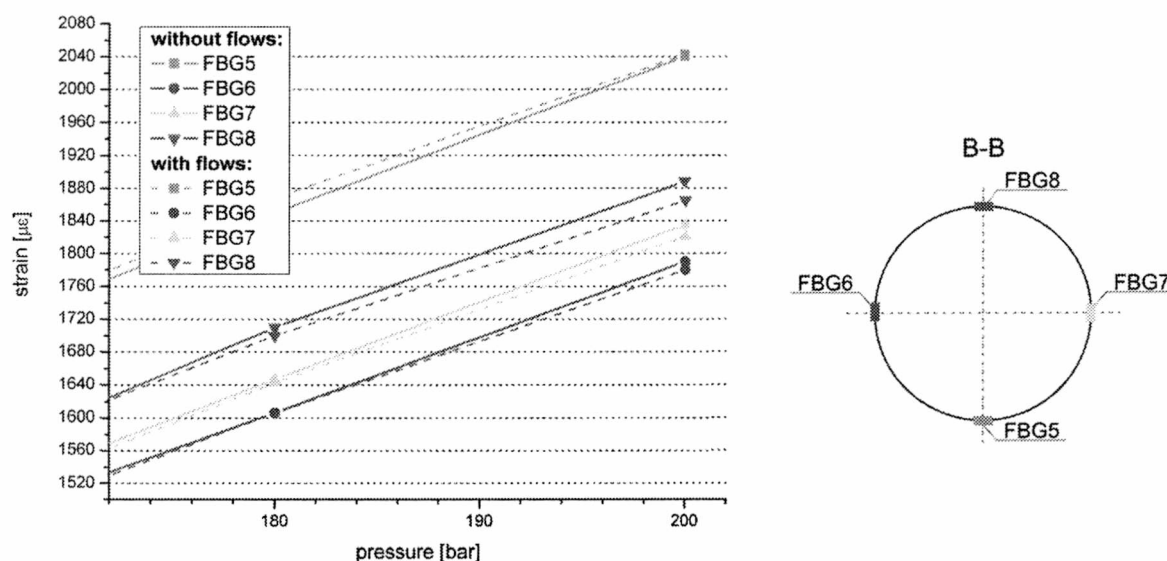
Rys. 5.30. Wzajemne rozmieszczenie programowanych defektów oraz czujników na zbiorniku testowym.

W przekroju kołowym A-A znajdowało się krótsze z nacięć, a także cztery siatki Bragga (FBG1 ÷ FBG4). Sam defekt znajdował się w połowie odległości pomiędzy siatkami FBG1 oraz FBG2. Wyniki pomiarów odkształceń zmierzonych w przekroju A-A, przed i po wykonaniu defektów, przedstawione zostały poniżej na Rys. 5.31. Należy zauważyć, iż wartość lokalnych odkształceń, rejestrowana przez cztery różne obwodowe czujniki, po

wykonaniu nacięć zmalała (linie przerywane), przy czym największa zmiana jest rejestrowana dla czujników znajdujących się najbliżej defektu (blisko $30\text{ }\mu\epsilon$ dla odkształceń rejestrowanych przez FBG1 oraz prawie $40\text{ }\mu\epsilon$ dla odkształceń rejestrowanych przez FBG2). Zmiany rejestrowane przez pozostałe czujniki były mniejsze niż $10\text{ }\mu\epsilon$ [139].



Rys. 5.31. Lokalne odkształcenia zbiornika bez defektu oraz z defektem programowanym, mierzone w przekroju A-A zawierającym krótsze z nacięć.

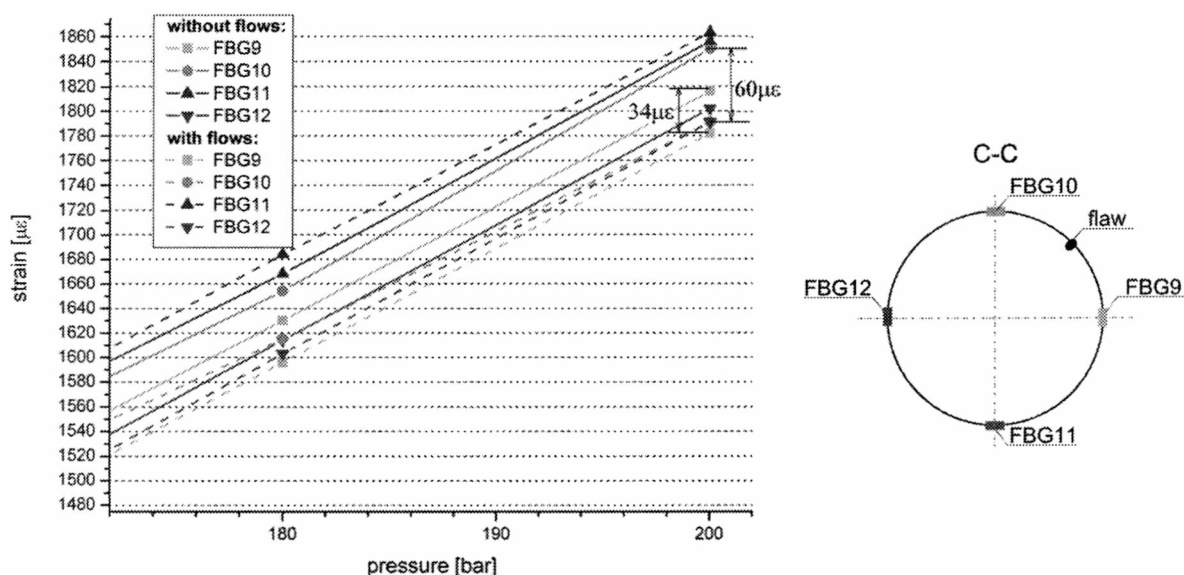


Rys. 5.32. Lokalne odkształcenia zbiornika bez defektu oraz z defektem programowanym, mierzone w przekroju B-B nie zawierającym żadnego z nacięć.

Na Rys. 5.32 przedstawione zostały charakterystyki pomiarowe zarejestrowane w przekroju B-B nie zawierającym żadnego z wykonanych nacięć. Należy zauważyć, iż wartości lokalnie mierzonych odkształceń dla czterech różnych czujników nie zmieniły się

znacząco po wprowadzeniu programowanych defektów w sąsiednich obszarach zbiornika. Dla czujników FBG5÷FBG7 zarejestrowane zmiany zawierają się w przedziale 10÷15 $\mu\epsilon$, a jedynie dla czujnika oznaczonego FBG8, który był zlokalizowany najbliżej dłuższego defektu różnica ta wynosi ok. 25 $\mu\epsilon$ [139].

W ostatnim z mierzonych przekrojów zbiornika (przekrój C-C zawierający jeden z końców dłuższego nacięcia) zarejestrowano zbliżone rezultaty jak dla przekroju A-A. Uzyskane rezultaty pomiarowe przedstawiono poniżej (Rys. 5.33). Wykonany w warstwie nośnej zbiornika defekt był zlokalizowany pomiędzy czujnikami FBG9 oraz FBG10, powodując spadek mierzonych wartości lokalnych odkształceń przez wspomniane czujniki o odpowiednio $\sim 34 \mu\epsilon$ oraz $60 \mu\epsilon$. Zmiany rejestrowane przez pozostałe czujniki w analizowanym przekroju były mniejsze niż 10 $\mu\epsilon$ [139].

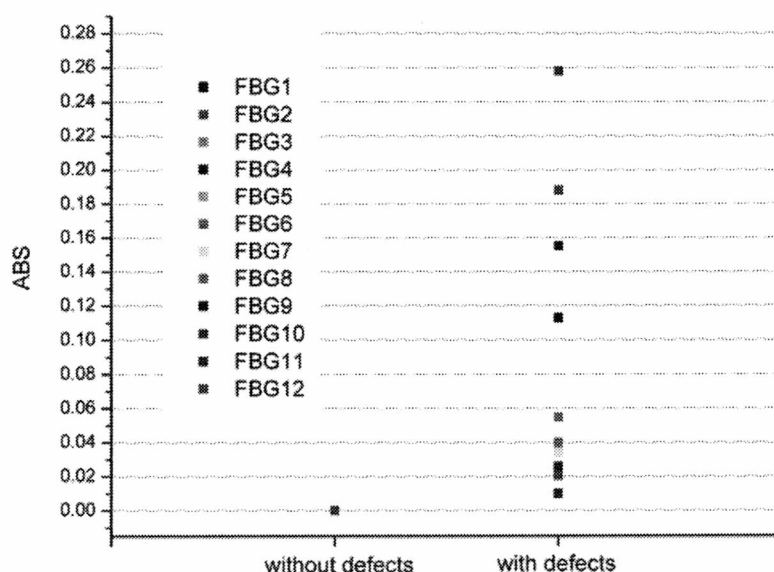


Rys. 5.33. Lokalne odkształcenia zbiornika bez defektu oraz z defektem programowanym, mierzone w przekroju C-C zawierającym dłuższe z nacięć.

Poniżej na Rys. 5.34 przedstawiona została analiza porównawcza lokalnych odkształceń obwodowych dla zbiornika bez defektu oraz z wprowadzonymi programowanymi nacięciami wykonanymi w warstwie kompozytowej. Analiza została przeprowadzona zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 5.3, polegającą na wyznaczeniu „sztucznego” współczynnika ABS, definiowanego jako różnica współczynników kierunkowych dla prostych „odkształcenie – ciśnienie” wyznaczonych w pomiarze referencyjnym (zbiornik bez defektu) oraz kolejnym (zbiornik z nacięciami).

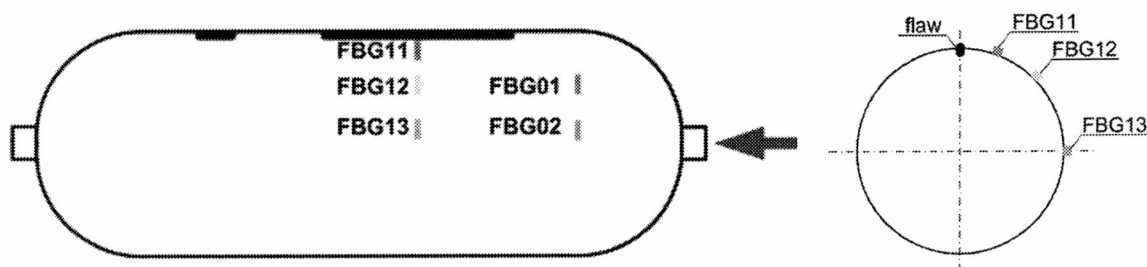
Można zauważyć, iż wprowadzenie defektów do struktury wysokociśnieniowego zbiornika spowodowało zakłócenie jednorodności w rozkładzie pola odkształceń na powierzchni zbiornika, co przełożyło się bezpośrednio na zmianę wartości współczynnika ABS. Szczególnie wyraźne są zmiany wartości wspomnianego parametru dla czujników ozna-

czonych jako: FBG1, FBG2, FBG9 oraz FBG10. Jest to bezpośrednio związane z opisaną powyżej zmianą nachylenia charakterystyk odkształcenie – ciśnienie w przekrojach A-A oraz C-C. Można stwierdzić, iż po dokonaniu nacięć we wzmacniającej powłoce kompozytowej została zaburzona symetria odkształceń w przekrojach zawierających defekty. Wynika to z lokalnej zmiany podatności zbiornika na odkształcenia, którą można zdefiniować jako nachylenie krzywej odkształcenie – ciśnienie [138].



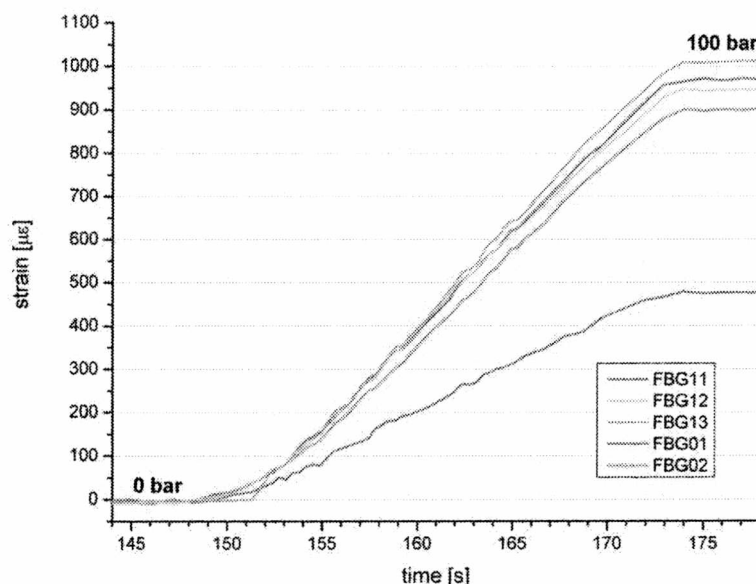
Rys. 5.34. Analiza różnic odkształceń pomiędzy pomiarem referencyjnym i pomiarami wykonanymi dla zbiornika z programowanymi defektami.

W celu potwierdzenia powyższego założenia przeprowadzono dodatkowe badania z wykorzystaniem innego zbiornika z wstępnie wprowadzonymi przez producenta zaburzeniami. Ich kształt i rozmiary były zbliżone do defektów opisywanych wcześniej (250 x 1 x 2 mm oraz 55 x 1 x 2 mm). Początkowo czujniki naklejone zostały jedynie w obrębie dużego nacięcia (pięć światłowodowych siatek Bragga). Zbiornik był obciążany ciśnieniem w zakresie od 0 do 100 bar przy użyciu pompy hydraulicznej do badań niszczących. Rozmieszczenie czujników FBG względem defektów pokazane zostało poniżej na Rys. 5.35.

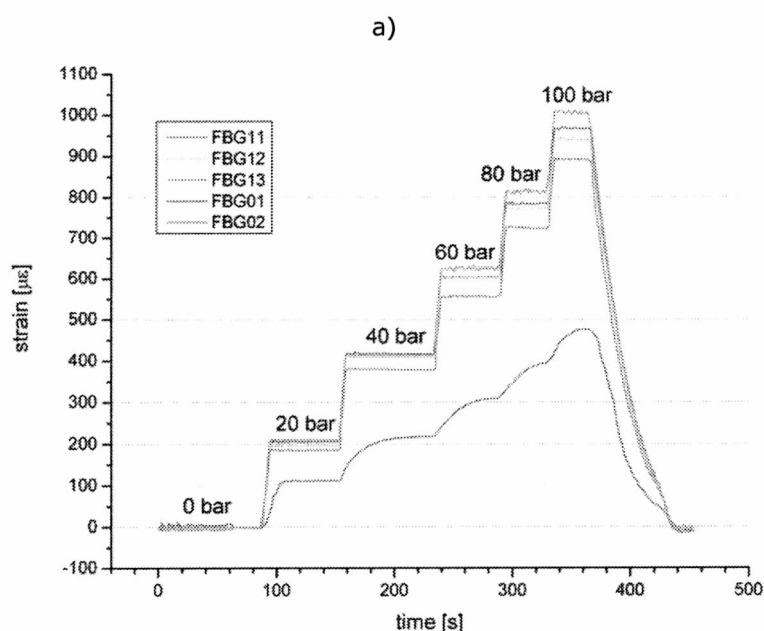


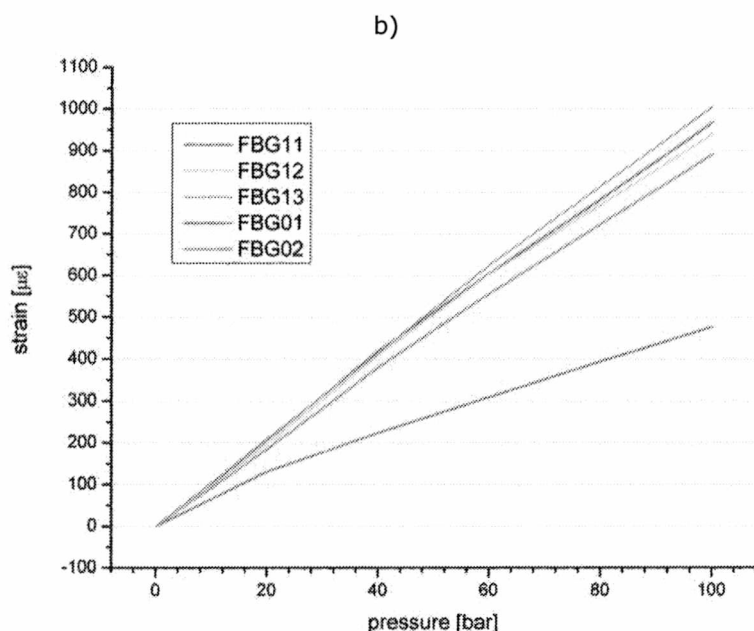
Rys. 5.35. Rozmieszczenie czujników na zdefektowanym zbiorniku testowym.

Uzyskane wyniki pomiarowe zostały przedstawione na Rys. 5.36 oraz Rys. 5.37. Należy zauważyć, że lokalne odkształcenie obwodowe, rejestrowane przez czujnik FBG11 zlokalizowany najbliżej defektu, są najmniejsze i wynoszą ok. 470 $\mu\epsilon$. Odkształcenia rejestrowane przez siatki FBG12 oraz FBG13 są znacząco większe i wynoszą odpowiednio 950 $\mu\epsilon$ oraz 1025 $\mu\epsilon$. Wszystkie te czujniki zlokalizowane są na tym samym przekroju kołowym zbiornika i w niezdefektowanym obiekcie powinny rejestrować zbliżone wartości odkształceń.



Rys. 5.36. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika w zakresie ciśnień od 0 do 100 bar.

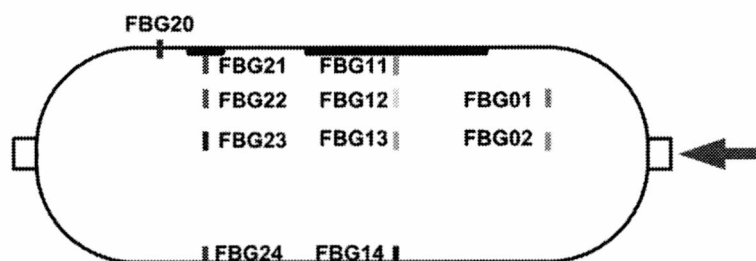




Rys. 5.37. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika w zakresie ciśnień od 0 do 100 bar mierzone w funkcji czasu w trakcie próby „step-by-step” (a) oraz ciśnienia (b).

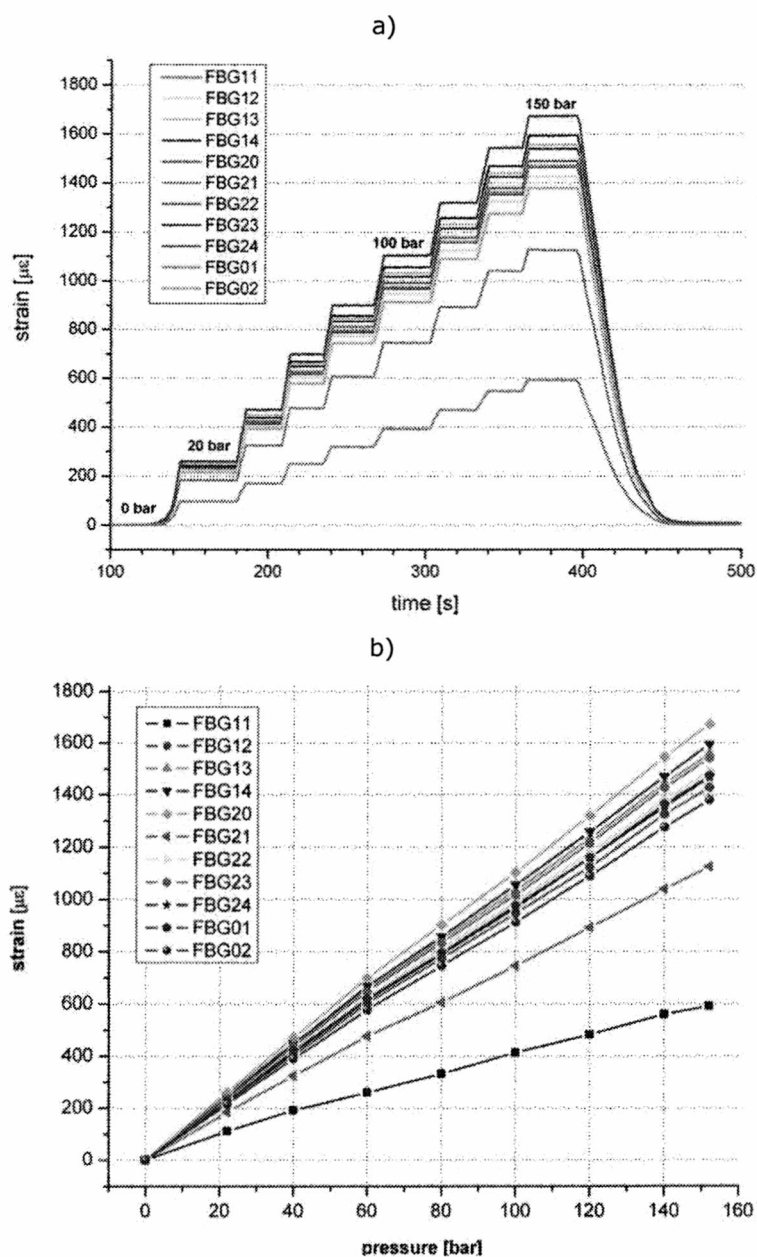
Czujniki oznaczone jako FBG01 oraz FBG02 umieszczone zostały w obszarze niezdefektowanym. Dla idealnego zbiornika, odkształcenia przez nie wskazywane powinny być takie same, jednak tak nie jest. Różnica wynosi ok. 70 $\mu\epsilon$. Wynika to prawdopodobnie z występowania lokalnego defektu materiałowego, bądź też wpływu defektu programowanego, który zakłóca równomierny rozkład pola odkształceń na powierzchni badanego zbiornika.

W kolejnym etapie badań naklejonych zostało następne sześć czujników FBG. Rozmieszczenie czujników przedstawione zostało na Rys. 5.38. Czujniki oznaczone jako: FBG21÷FBG23 zostały zlokalizowane w przekroju zawierającym krótszy z defektów. Dodatkowo zainstalowano dwa czujniki (FBG14 oraz FBG24), które mierzyły lokalne odkształcenia po przeciwnej stronie dwóch nacięć. Ostatni z dodatkowych czujników (FBG20) był umiejscowiony bezpośrednio w okolicach krótkiego nacięcia.



Rys. 5.38. Rozmieszczenie czujników FBG oraz programowanych defektów na zbiorniku testowym.

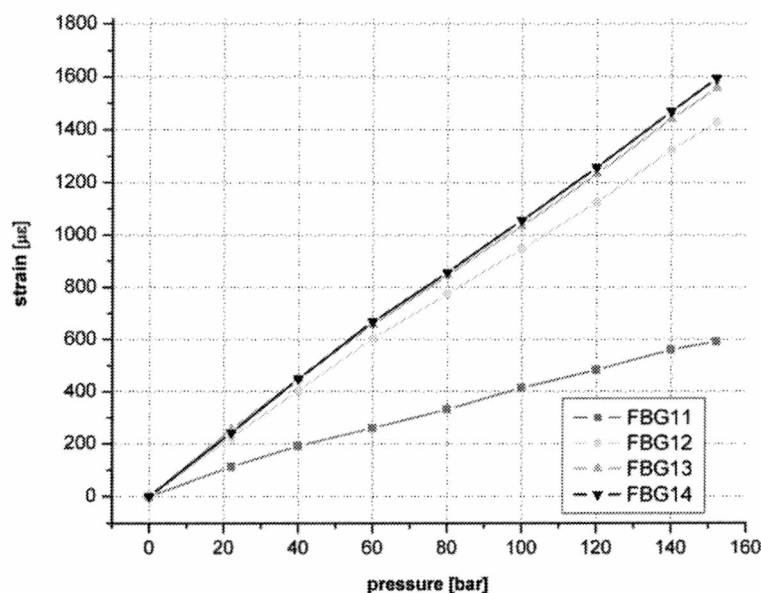
Zbiornik był obciążany statycznie ciśnieniem w zakresie od 0 do 150 bar przy użyciu pompy do badań niszczących. Jako medium robocze zastosowano wodę. Uzyskane wyniki pomiarowe przedstawione zostały na Rys. 5.39 (wszystkie czujniki), Rys. 5.40 (czujniki obwodowe w przekroju zawierającym duży defekt) oraz Rys. 5.41 (czujniki obwodowe w przekroju zawierającym mały defekt).



Rys. 5.39. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika przez jedenaście czujników typu FBG, w zakresie ciśnień od 0 do 150 barów, mierzone w funkcji czasu, w trakcie próby „step-by-step” (a) oraz ciśnienia (b).

Należy zauważyć, iż lokalne odkształcenie obwodowe, rejestrowane przez czujnik FBG11, zlokalizowany najbliżej dużego defektu, są najmniejsze i wynoszą ok. 625 $\mu\epsilon$

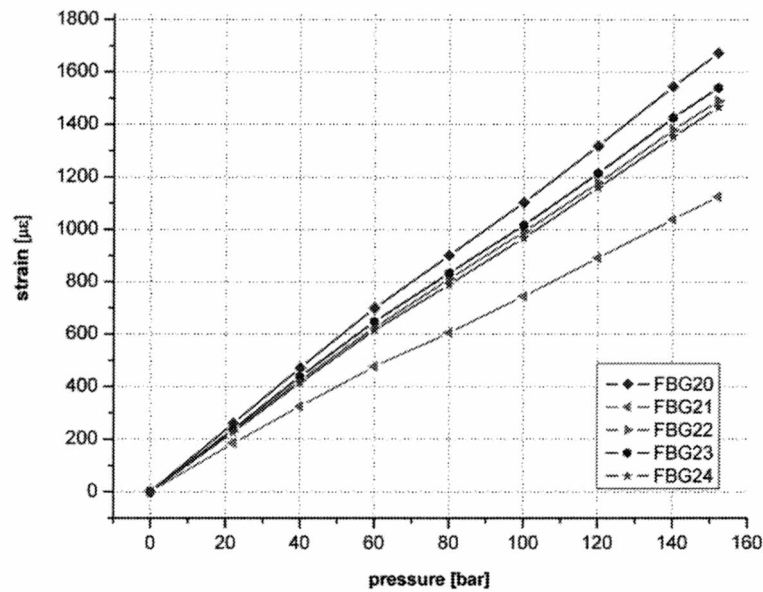
przy ciśnieniu wewnętrznym w zbiorniku rzędu 150 bar. Odształcenia rejestrowane przez siatki FBG12, FBG13 oraz FBG14 są znacząco większe i wynoszą odpowiednio 1450 $\mu\epsilon$, 1525 $\mu\epsilon$ oraz 1640 $\mu\epsilon$, dla ciśnienia 150 bar. Wszystkie wspomniane czujniki zlokalizowane zostały na tym samym przekroju kołowym zbiornika, przy czym czujniki FBG11 oraz FBG14 znajdują się po przeciwnych stronach zbiornika [139].



Rys. 5.40. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika, mierzone w obrębie dużego nacięcia, przy zmianie ciśnienia od 0 do 150 bar

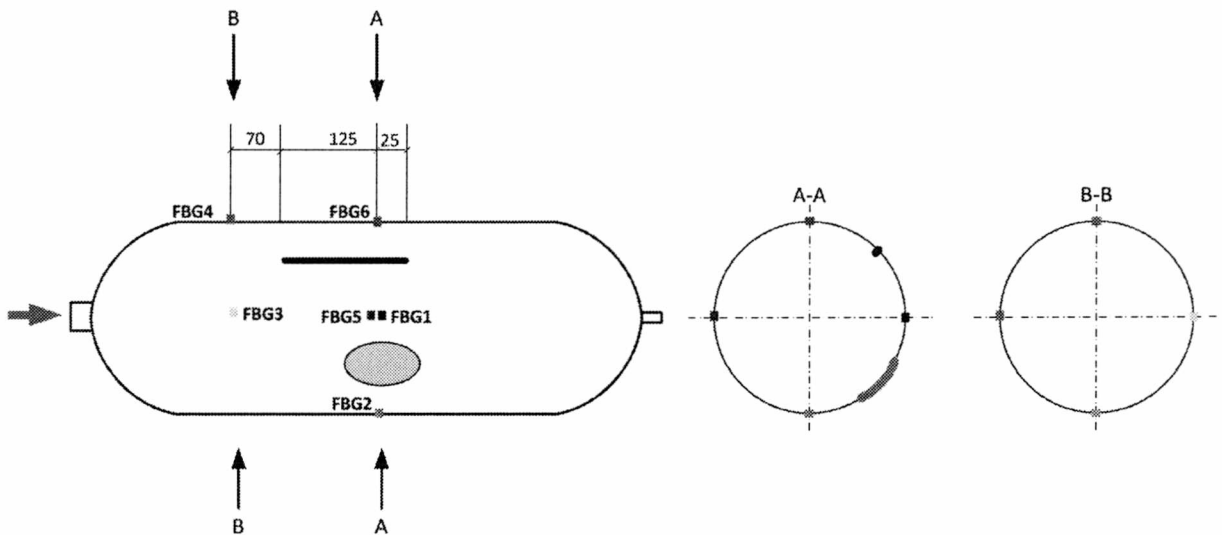
Jak już wspomniano, na Rys. 5.41 przedstawione zostały lokalne odkształcenia obwodowe zbiornika mierzone przez FBG w obrębie małego defektu. Podobnie jak wcześniej, najmniejsze odkształcenia rejestrowane były przez czujnik znajdujący się najbliżej defektu (FBG21) i wynosiły ok. 1125 $\mu\epsilon$ dla ciśnienia 150 bar (dla porównania odkształcenia po przeciwnej stronie zbiornika wynosiły 1470 $\mu\epsilon$). Wartość odkształceń wzrastała wraz z oddalaniem się od defektu w kierunku obwodowym (ok. 1520 $\mu\epsilon$ mierzone przez FBG22 oraz 1555 $\mu\epsilon$ przez FBG23). Największe deformacje zarejestrowane były jednak z boku nacięcia (na jego przedłużeniu, FBG20) i wynosiły około 1670 $\mu\epsilon$, przy ciśnieniu 150 bar [139].

Podsumowując, czujniki zainstalowane w kierunku obwodowym w okolicach nacięcia, wskazują znacznie mniejsze odkształcenia w porównaniu do czujników oddalonych od defektu. Świadczy to o owalizacji zbiornika w przekroju, na którym zainstalowano łańcuch czujników FBG. Ponadto czujniki mierzące odkształcenia po przeciwnych stronach zbiornika (w tym samym przekroju) wskazują duże różnice gdy jeden z nich jest zlokalizowany blisko defektu. Zmianie ulega wówczas współczynnik nachylenia prostej $\epsilon = f(t)$ dla każdego z czujników, czyli zmienia się podatność zbiornika na odkształcanie [139].



Rys. 5.41. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika, mierzone w obrębie małego nacięcia, przy zmianie ciśnienia od 0 do 150 bar.

W kolejnym etapie przeprowadzono badania statyczne zbiornika typu 4-tego, wykonanego w technologii hybrydowej, o nominalnym ciśnieniu pracy wynoszącym 200 bar. Celem tych badań było potwierdzenie słuszności koncepcji wykrywania defektów w strukturze materiału kompozytowego w postaci nacięć oraz delaminacji.

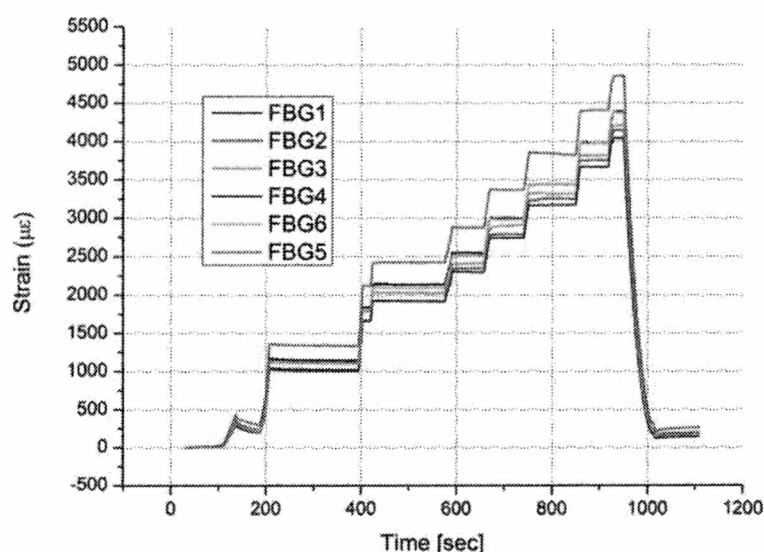


Rys. 5.42. Rozmieszczenie czujników FBG oraz defektów (nacięcie i delaminacja) na kompozytowym zbiorniku hybrydowym.

Jak już wspomniano, kompozytowa warstwa nośna testowego zbiornika wykonana została z dwóch warstw: epoksydowo-węglowej oraz epoksydowo-szklanej o grubościach odpowiednio: $\sim 1,9$ mm oraz $\sim 8,8$ mm. Warstwa spodnia (CFRC) nawinięta została bezpośrednio na polimerowym linerze, na jego części cylindrycznej, w całości w kierunku

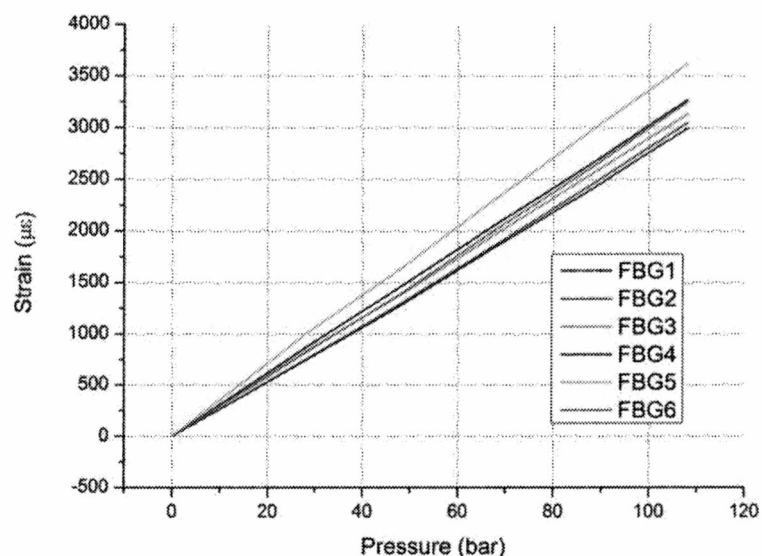
obwodowym. Warstwa wzmacniana włóknem szklanym nawinięta została pod różnymi kątami na całej powierzchni zbiornika. Na badanym zbiorniku zainstalowanych zostało sześć czujników FBG, każdy w kierunku obwodowym – zgodnie z kierunkiem nawoju ostatniej warstwy kompozytowej, a ich rozmieszczenie przedstawione zostało na Rys. 5.42.

W pierwszym etapie realizowanych badań, zbiornik obciążony został ciśnieniem wewnętrznym zakresie od 0 do 140 barów (Rys. 5.43). Jako że zbiornik nie przeszedł testu hydraulicznego po procesie produkcji, dlatego też w trakcie pierwszego obciążania ciśnieniem słuchać było wyraźne trzaski związane z „układaniem się” włókna i żywicy. Ponadto zainstalowane na jego powierzchni czujniki odkształceń zarejestrowały odkształcenia resztkowe, których wartości mieściły się w przedziale od 140 do 260 $\mu\epsilon$ (widoczne na Rys. 5.43).

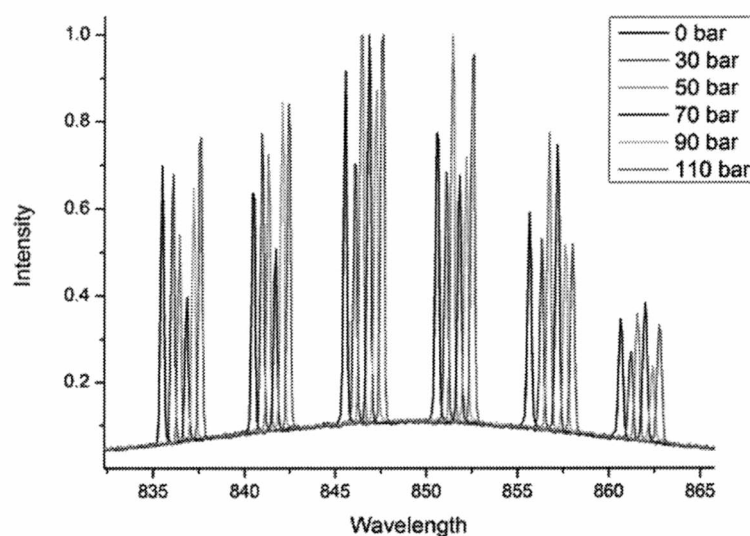


Rys. 5.43. Odkształcenia zbiornika zarejestrowane w trakcie próby „step-by-step”, w zakresie ciśnień od 0 do 140 barów.

W kolejnym etapie badań, zbiornik obciążany był ciśnieniem w przedziale do 110 barów. Uzyskana w ten sposób charakterystyka lokalnych odkształceń zbiornika w funkcji ciśnienia wewnętrznego (Rys. 5.44) stanowiła punkt odniesienia do dalszych badań z programowanymi defektami. Na Rys. 5.45 przedstawiono zmiany spektrum odbiciowego, pochodzącego od zainstalowanych czujników FBG. Przesunięcie poszczególnych pików związane jest ze wzrostem ciśnienia wewnętrznego, a tym samym odkształceń kompozytowej powłoki nośnej zbiornika.

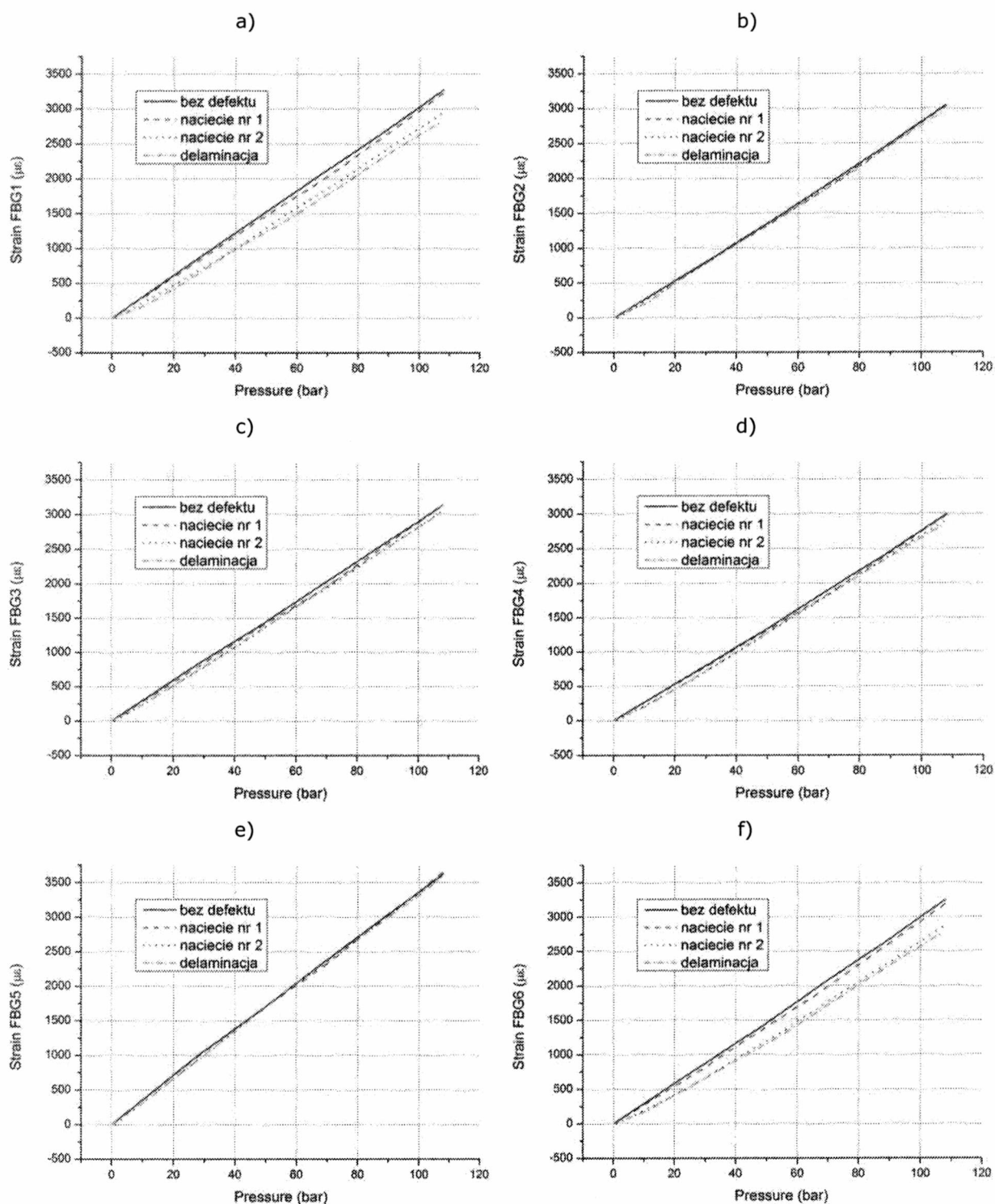


Rys. 5.44. Lokalne odkształcenia zbiornika hybrydowego w funkcji ciśnienia wewnętrznego.



Rys. 5.45. Zmiana spectrum odbiciowego od czujników FBG, zainstalowanych na kompozytowym zbiorniku hybrydowym, w trakcie próby quasistatycznej.

Kolejnym krokiem realizowanych badań było sprawdzenie odpowiedzi zainstalowanych czujników na wprowadzenie programowanego defektu w postaci nacięcia kompozytowej powłoki nośnej zbiornika. Wymiary wykonanego uszkodzenia wynosiły: 150 mm długości oraz 2,7 mm głębokości (seria pomiarowa nr 1), natomiast w drugiej serii pomiarowej głębokość nacięcia powiększono do 4,4 mm. Podane głębokości nacięcia, to wartość średnia zmierzona w kilku miejscach na całej jego długości. Zatem wykonany defekt stanowił w pierwszej serii 25% grubości całkowitej powłoki nośnej zbiornika (GFRC + CFRC) lub 30,4% grubości tylko warstwy szklanej (GFRC), natomiast w drugiej odpowiednio: 41,2% i 50%.



Rys. 5.46. Lokalne odkształcenia hybrydowego zbiornika kompozytowego, zarejestrowane przez czujniki FBG1÷FBG6, w funkcji ciśnienia wewnętrznego dla kolejnych defektów programowanych.

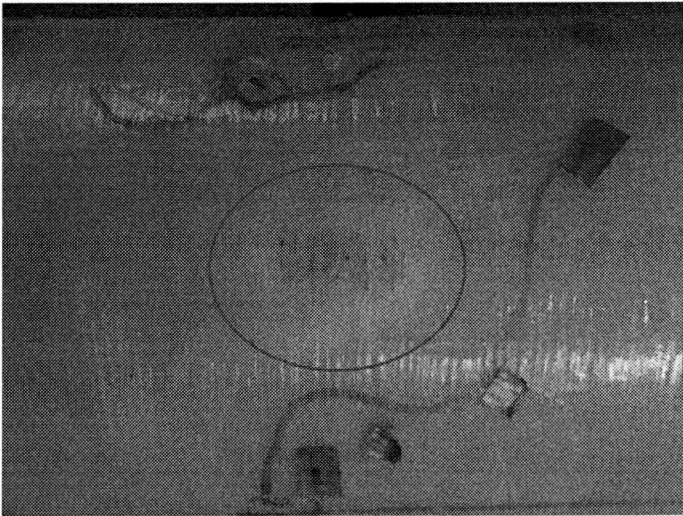
Wyniki pomiaru lokalnych odkształceń, zarejestrowane przez wszystkie czujniki FBG, przedstawione zostały na Rys. 5.46. Można zauważyć, że w badanym zakresie ciśnień zbiornik odkształcał się liniowo w poszczególnych punktach, jednakże wartości odkształceń rejestrowane w różnych punktach zbiornika miały różne nachylenie krzywej odkształcenie-ciśnienie. Po wykonaniu pierwszego nacięcia, czujniki zlokalizowane najbliżej de-

fektu, czyli FBG1, FBG6 a także FBG5, zarejestrowały niewielkie zmiany w mierzonym polu odkształceń (odpowiednio: $-44 \mu\epsilon$, $-62 \mu\epsilon$ oraz $31 \mu\epsilon$ dla ciśnienia wewnętrznego 110 bar). Różnice we wskazaniach pozostałych czujników były pomijalnie małe. Pogłębienie nacięcia do 4,4 mm spowodowało zmianę pola odkształceń, zarejestrowaną wyraźnie przez niemal wszystkie czujniki. Największe zmierzone zmiany w lokalnych odkształceniach wynosiły $-277 \mu\epsilon$ (FBG2) oraz $-307 \mu\epsilon$ (FBG6).

W ostatnim etapie badań, na testowym zbiorniku wykonano lokalną delaminację powłoki kompozytowej. Jej lokalizację pomiędzy czujnikami FBG1 oraz FBG2 przedstawiono na Rys. 5.42 oraz na zdjęciu poniżej (Rys. 5.47). Wprowadzenie kolejnego defektu do struktury kompozytu spowodowało zmianę wartości rejestrowanych odkształceń. Największe zmiany zarejestrowały czujniki FBG1, FBG2 oraz FBG6 (odpowiednio: $-112 \mu\epsilon$, $-78 \mu\epsilon$ oraz $-93 \mu\epsilon$). Szczegółowe wyniki badań dla wszystkich punktów pomiarowych zebrano w Tab. 5.5.

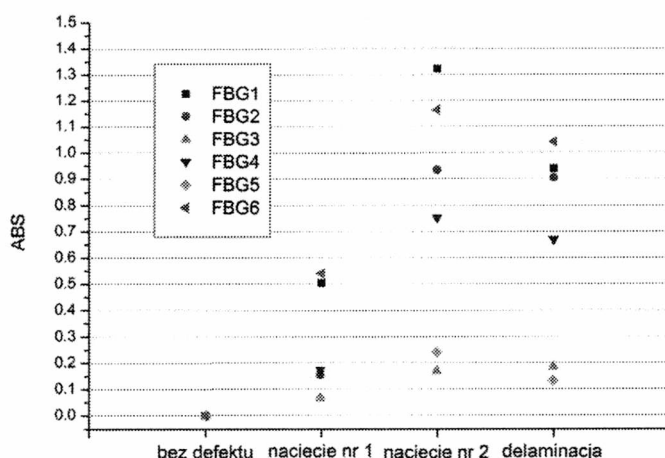
Tab. 5.5. Zmiana lokalnych odkształceń zbiornika hybrydowego po wykonaniu kolejnych programowanych defektów.

	Nacięcie nr 1 $\Delta\epsilon [\mu\epsilon]$	Nacięcie nr 2 $\Delta\epsilon [\mu\epsilon]$	Delaminacja $\Delta\epsilon [\mu\epsilon]$
FBG1	-44	-277	-112
FBG2	-9	22	-78
FBG3	2	-77	-6
FBG4	-10	-71	-44
FBG5	31	-51	-16
FBG6	-62	-307	-93



Rys. 5.47. Widok programowanego defektu w postaci delaminacji na powierzchni testowego zbiornika hybrydowego.

Na rysunku Rys. 5.48 przedstawiona została analiza lokalnych odkształceń obwodowych dla różnych defektów programowanych wprowadzonych do zbiornika wysokociśnieniowego. Analiza została przeprowadzona zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 5.3, polegającą na wyznaczeniu „sztucznego” współczynnika ABS, wyznaczanego jako różnica współczynników kierunkowych dla prostych „odkształcenie – ciśnienie”, wyznaczonych w badaniach quasistatycznych zbiornika bez defektu oraz kolejnych.



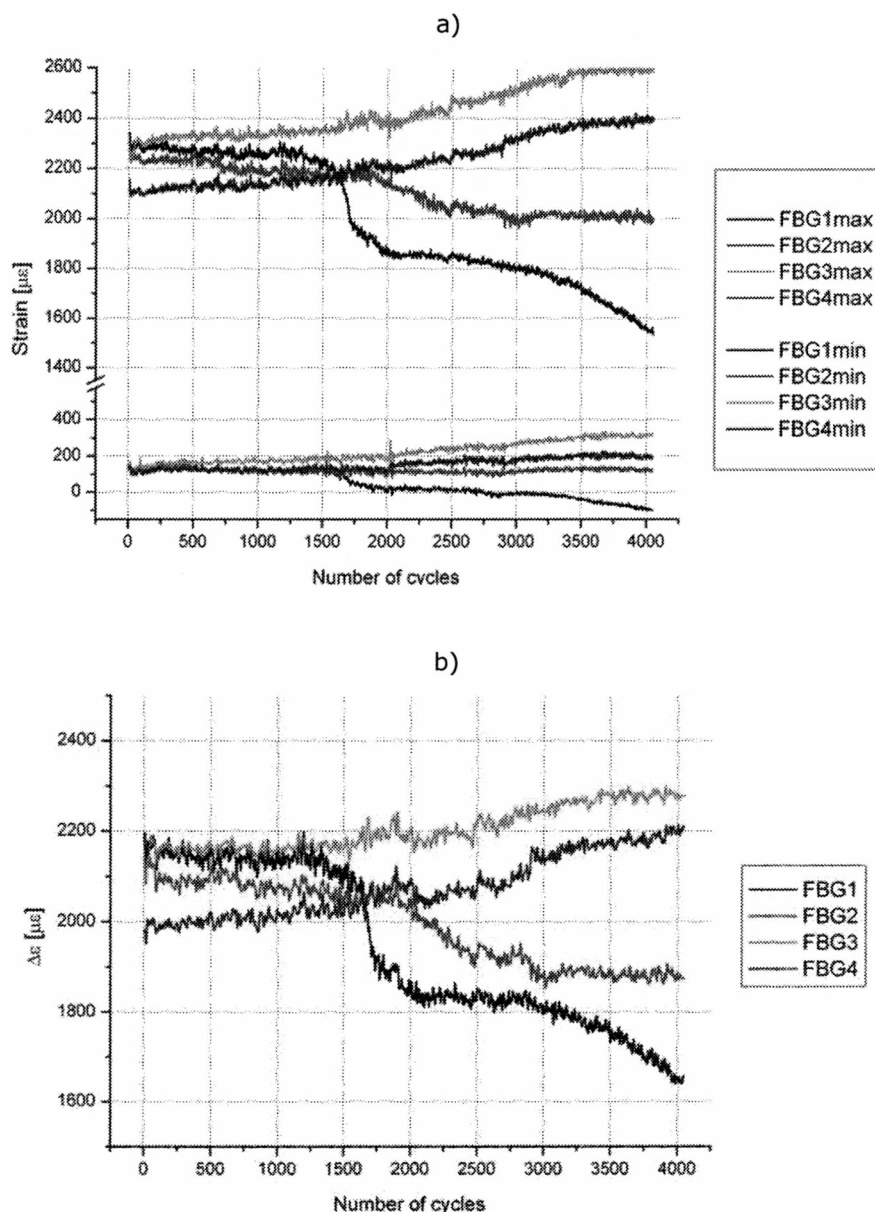
Rys. 5.48. Analiza wyników pomiaru lokalnych odkształceń zbiornika hybrydowego dla różnych etapów zdefektowania jego struktury kompozytowej (detekcja defektów w konstrukcji zbiornika wysokociśnieniowego).

Jako punkty referencyjne przyjęte zostały kolejne kroki realizowanych pomiarów, tzn. dla pomiarów oznaczonych „nacięcie nr 1” były to pomiary z poszczególnych czujników FBG oznaczonych jako „bez defektu”, dla pomiarów „nacięcie nr 2” były to wyniki z analizy „nacięcie nr 1”, natomiast dla pomiarów zbiornika z delaminacją była to analiza „nacięcie nr 2”. Przedstawiona analiza współczynników ABS potwierdza opisane powyżej wyniki. Dla wykrycia defektu oznaczonego jako „nacięcie nr 1” najczulsze okazały się czujniki FBG1 oraz FBG2. Na Rys. 5.48 widoczny jest wyraźny skok wartości współczynników ABS dla tychże czujników. Zwiększenie głębokości nacięcia spowodowało dalszy wzrost wartości współczynnika ABS dla tych samych czujników, ale również zostało wykryte przez czujniki FBG2 oraz FBG4. Delaminacja kompozytowej warstwy nośnej zbiornika hybrydowego spowodowała największą zmianę współczynnika ABS dla czujników FBG1, FBG2 oraz FBG6.

5.5.4 Badania cykliczne zbiorników z defektami programowanymi

W następnym etapie badań zbiornik, w którym wykonano wcześniej nacięcia oraz przeprowadzono badania statyczne (opisane w 5.5.3), został poddany próbie cyklicznej w temperaturze pokojowej. Zgodnie z normami dotyczącymi wpływu uszkodzeń ze-

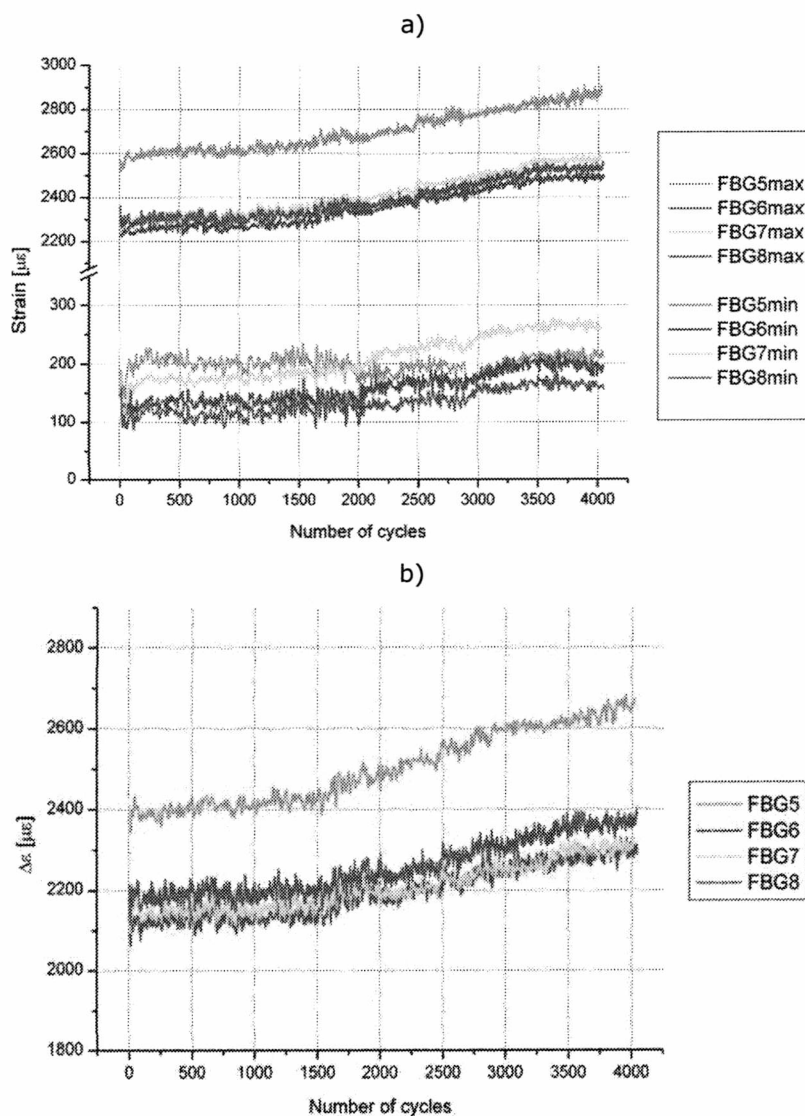
wewnętrznych na wytrzymałość zbiornika (tzw. flaw tolerance test, [2]) przeznaczanego do gromadzenia sprężonego wodoru, wykonanych zostało ponad 4050 cykli, w zakresie ciśnień od 20 do 258,5 barów ($1,25 \times \text{NWP}$). Na przedstawionych poniżej rysunkach przedstawione zostały uzyskane wyniki pomiarowe.



Rys. 5.49. Wartości lokalnych odkształceń zdefektowanego zbiornika, mierzone przez światłowodo-we siatki Bragga w przekroju A-A (a) dla ciśnienia 20 bar (min) oraz 258,5 bar (max), a także amplituda lokalnie mierzonych odkształceń (b) w funkcji liczby cyklicznych obciążeń zbiornika, w zakresie 20 – 258,5 bar

Na Rys. 5.49 przedstawione zostały wyniki pomiarów lokalnych wartości odkształceń w przekroju zawierającym krótsze z nacięć (przekrój A-A). Rys. 5.49a przedstawia odkształcenia minimalne ($\epsilon_{\min}$) oraz maksymalne ($\epsilon_{\max}$), zarejestrowane przez czujniki FBG1

÷ FBG4, dla ciśnień 20 oraz 258,5 bar, natomiast na Rys. 5.49b pokazano zmianę amplitudy odkształceń ($\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$) w funkcji zrealizowanych obciążeń cyklicznych badanego zbiornika. Należy zauważyć, iż w analizowanym przekroju, wraz ze wzrostem liczby cykli, spada wartość odkształceń rejestrowanych przez FBG1 oraz FBG2, znajdujących się najbliżej defektu. Jednocześnie można zauważyć wzrost amplitudy odkształceń rejestrowanych przez pozostałe czujniki. Świadczy to o kumulacji lokalnych uszkodzeń w powłoce nośnej zbiornika kompozytowego, a także wzroście programowanego defektu.

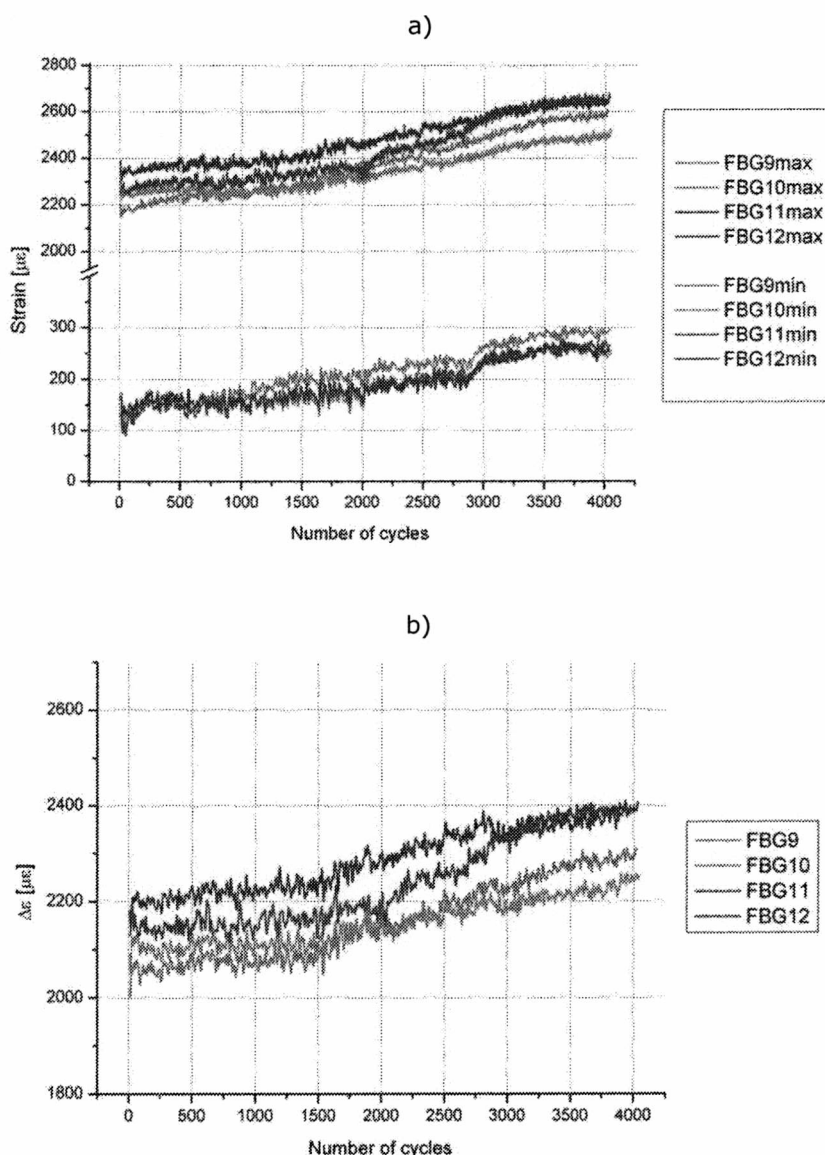


Rys. 5.50. Wartości lokalnych odkształceń zdefektowanego zbiornika, mierzone przez światłowodo-
we siatki Bragga w przekroju B-B (a) dla ciśnienia 20 bar (min) oraz 258,5 bar (max), a także am-
plituda lokalnie mierzonych odkształceń (b) w funkcji liczby cyklicznych obciążeń zbiornika w zakre-
sie 20 – 258,5 bar.

Na Rys. 5.50 przedstawione zostały wyniki pomiarów lokalnych wartości odkształceń
w przekroju nie zawierającym programowanych defektów (przekrój B-B). Podobnie jak
dla przekroju A-A, Rys. 5.50a przedstawia odkształcenia minimalne ($\epsilon_{\min}$) oraz maksy-

malne ($\epsilon_{\max}$), zarejestrowane przez czujniki FBG5 ÷ FBG8, dla ciśnień 20 oraz 258,5 bar, natomiast na Rys. 5.50b pokazano zmianę amplitudy odkształceń ($\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$) w funkcji trwania badań cyklicznych. Należy zauważyć, iż w analizowanym przekroju, wraz ze wzrostem liczby cykli, wzrasta wartość odkształceń rejestrowanych przez wszystkie czujniki, co świadczy o kumulacji lokalnych uszkodzeń w powłoce nośnej zbiornika.

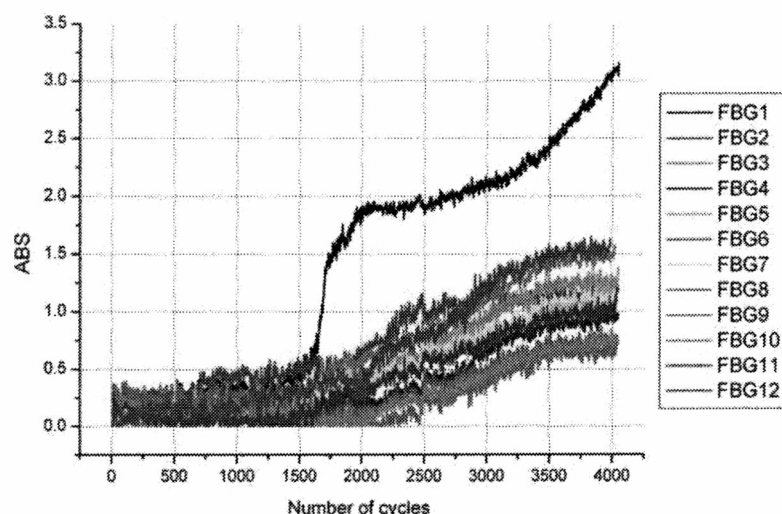
Widoczne na powyższych wykresach fluktuacje wartości maksymalnych oraz minimalnych odkształceń związane są ze specyfiką realizowanych badań cyklicznych. Jest to efekt rzeczywistych oscylacji maksymalnego i minimalnego ciśnienia wewnętrznego wokół wartości ustalonych (tzw. ciśnienia przełączania).



Rys. 5.51. Wartości lokalnych odkształceń zdefektowanego zbiornika mierzone przez światłowodo-we siatki Bragga w przekroju C-C (a) dla ciśnienia 20 bar (min) oraz 258,5 bar (max), a także amplituda lokalnie mierzonych odkształceń (b) w funkcji liczby cyklicznych obciążeń zbiornika w zakresie 20 – 258,5 bar.

Na rysunku powyżej (Rys. 5.51) przedstawione zostały wyniki pomiarów lokalnych wartości odkształceń w przekroju zawierającym drugi z wykonanych w warstwie nośnej zbiornika defektów (przekrój C-C). Podobnie jak powyżej, Rys. 5.51a przedstawia odkształcenia minimalne ($\epsilon_{\min}$) oraz maksymalne ($\epsilon_{\max}$), zarejestrowane przez czujniki FBG9 ÷ FBG12 dla ciśnień 20 oraz 258,5 bar, natomiast na Rys. 5.51b pokazano zmianę amplitudy odkształceń ($\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$) w funkcji czasu trwania badań eksperymentu. Należy zauważyć, iż w analizowanym przekroju, wraz ze wzrostem liczby cykli, wzrasta wartość odkształceń rejestrowanych przez wszystkie czujniki, co świadczy o kumulacji lokalnych uszkodzeń w powłoce nośnej zbiornika oraz rozwoju defektu programowanego. Największe zmiany amplitudy odkształcenia zostały zarejestrowane przez czujnik FBG12, czyli czujnik który zlokalizowany był najbliżej defektu.

Poniżej na rysunku Rys. 5.52 przedstawiona została analiza współczynników ABS dla każdego z zainstalowanych czujników FBG na badanym zbiorniku, przeprowadzona zgodnie z opisem przedstawionym w podrozdziale 5.3. Należy zauważyć, iż wraz ze wzrostem liczby cykli ciśnieniowych, wartość każdego z analizowanych współczynników ABS wzrasta. Świadczy to o wzroście kumulacji uszkodzeń w badanym zbiorniku. Największe zmiany zarejestrowane zostały przez czujniki FBG1, FBG2, FBG11 oraz FBG12, czyli czujniki zlokalizowane najbliżej wprowadzonych defektów programowanych.

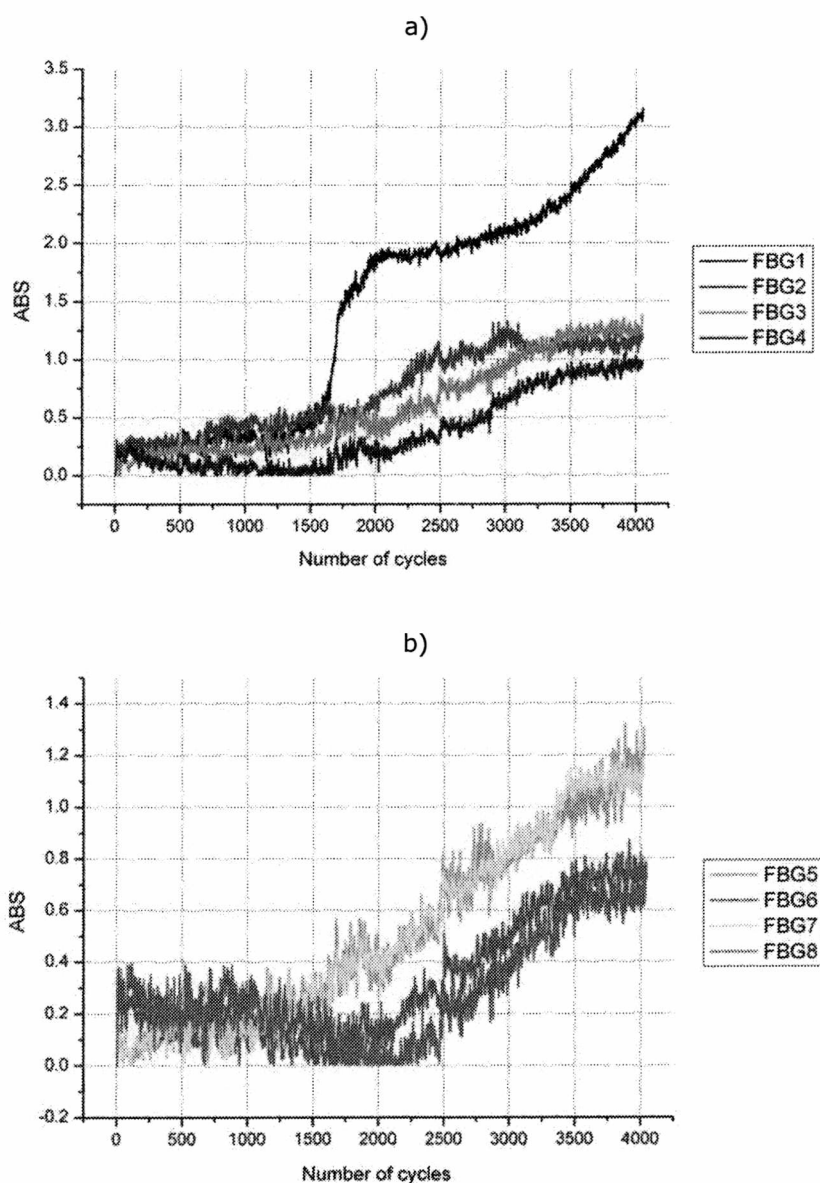


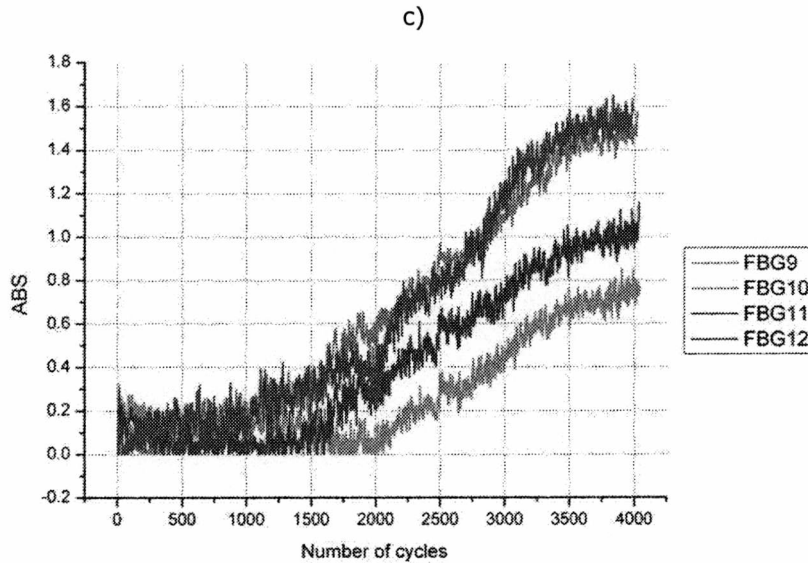
Rys. 5.52. Analiza współczynników ABS w funkcji liczby cykli zmian ciśnienia dla wszystkich czujników FBG zainstalowanych na badanym zbiorniku.

Wyniki uzyskane z badań cyklicznych dla trzech pierwszych czujników odpowiadają zmianom zarejestrowanym w trakcie pomiaru referencyjnego (statycznego). Jednakże długotrwały wpływ obciążeń cyklicznych na strukturę materiału kompozytowego, był stosunkowo większy w obszarze czujnika FBG12 niż FBG10 (jak miało to miejsce w przypadku badań statycznych).

Po około 1600 cykli zauważyć można zmianę nachylenia praktycznie wszystkich zarejestrowanych krzywych ABS – number of cycles, prezentowanych na Rys. 5.52 oraz Rys. 5.53. Szczególnie widoczna (w porównaniu do pozostałych) jest jednak zmiana zarejestrowana przez FBG1. Po ok. 1600 cyklach wartość współczynnika ABS zaczęła gwałtownie rosnąć przez kolejne ~400 cykli. Świadczy to o lokalnie występującej intensywnej kumulacji uszkodzeń, której przyrost został wyhamowany w przedziale od ~2000 do ~3000 cyklu, by znowu zacząć gwałtownie przyrastać.

Na kolejnych rysunkach (Rys. 5.53) przedstawiono zmiany współczynników ABS dla poszczególnych przekrojów zbiornika, poddanego badaniom cyklicznym.

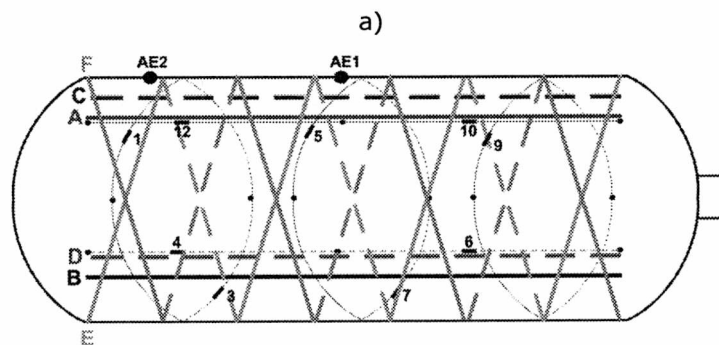




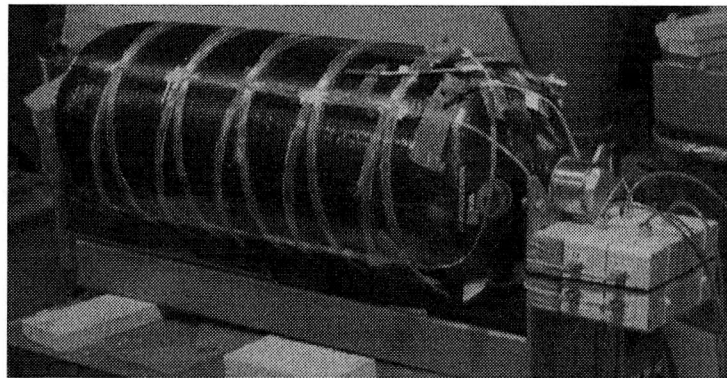
Rys. 5.53. Analiza współczynników ABS w funkcji liczby cykli zmian ciśnienia dla poszczególnych czujników FBG zainstalowanych w przekrojach badanego zbiornika: A-A (a), B-B (b) oraz C-C (c).

5.5.5 Wyznaczenie pola odkształceń zbiorników z defektami programowanymi przez różne czujniki światłowodowe

Realizując ideę tzw. inteligentnego zbiornika, podjęto próbę wyznaczenia wpływu programowanych uszkodzeń powłoki kompozytowej na sygnały mierzone przez różne czujniki, zlokalizowane na badanym zbiorniku. W tym celu zastosowane zostały dwa rodzaje czujników światłowodowych mierzących odkształcenia warstwy wzmacniającej: światłowodowe siatki Bragga (FBG typu „bare fiber”) oraz interferometryczne SOFO (w postaci tzw. głowic typu SMARTape® firmy SMARTEC). Ponadto, w celach porównawczych, zainstalowano czujniki emisji akustycznej. Czujniki typu FBG zapewniły lokalny pomiar wartości pola odkształceń testowego zbiornika, natomiast czujniki typu SOFO uśredniały wartość mierzonych odkształceń po całej swojej długości.



b)

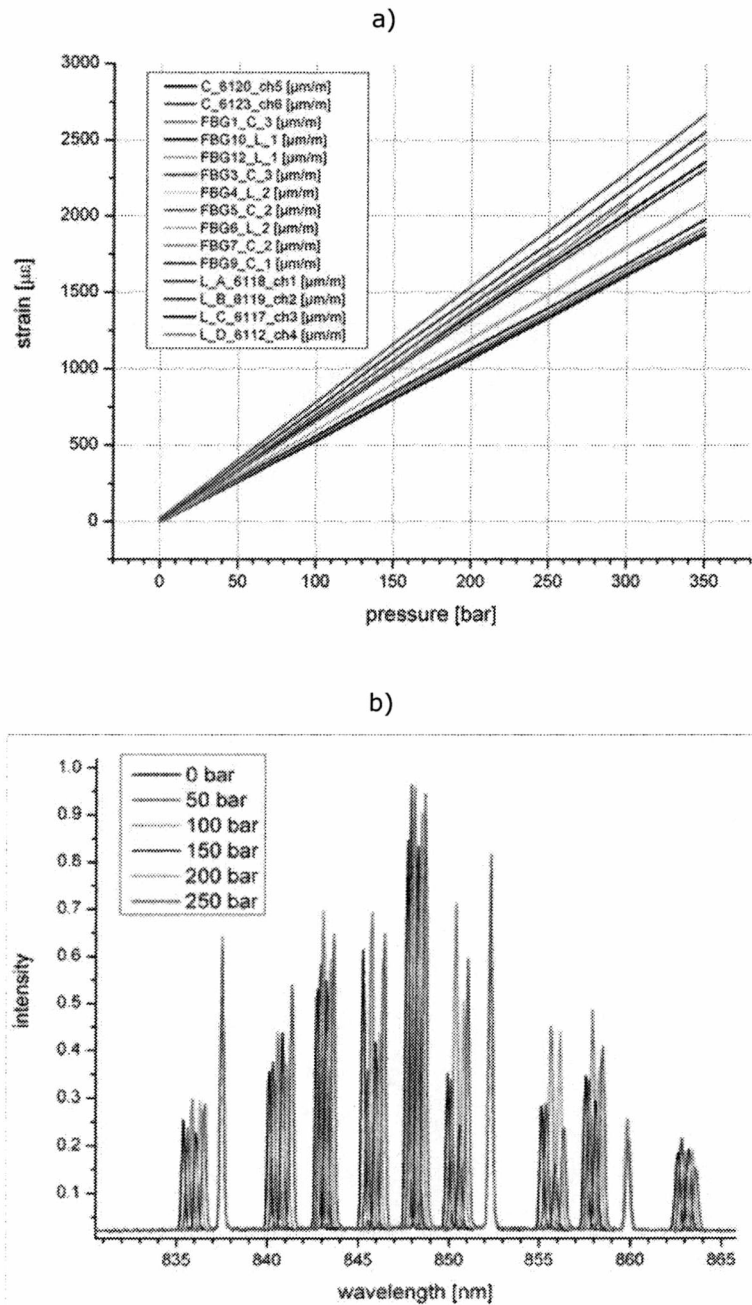


Rys. 5.54. Rozmieszczenie czujników na testowym obiekcie (a) oraz widok rzeczywistego zbiornika wysokociśnieniowego z zainstalowanymi na powierzchni czujnikami światłowodowymi (b).

Obiekt testowy stanowił fabryczny zbiornik typu 3-go, z linerem aluminiowym oraz wzmocnieniem wykonanym z kompozytu węglowo-epoksydowego, o nominalnym ciśnieniu pracy wynoszącym 350 bar. Odkształcenia w kierunku obwodowym mierzone były przez pięć siatek Bragga (FBG1, FBG3, FBG 5, FBG7 oraz FBG9), a także dwie głowice SMARTape (oznaczone: SOFO_E oraz SOFO_F, każda o długości 4,66 m). Odkształcenia wzdłużne były z kolei mierzone przez cztery światłowodowe siatki Bragga (FBG 4, FBG6, FBG10, FBG12) i cztery głowice interferometryczne (SOFO_A, SOFO_B, SOFO_C, SOFO_D, każda o długości 0,58 m). W celu kompensacji wpływu temperatury zastosowano czujniki referencyjne, zarówno FBG jak i SMARTape. Rozmieszczenie czujników pomiarowych przedstawione zostało poniżej na Rys. 5.54.

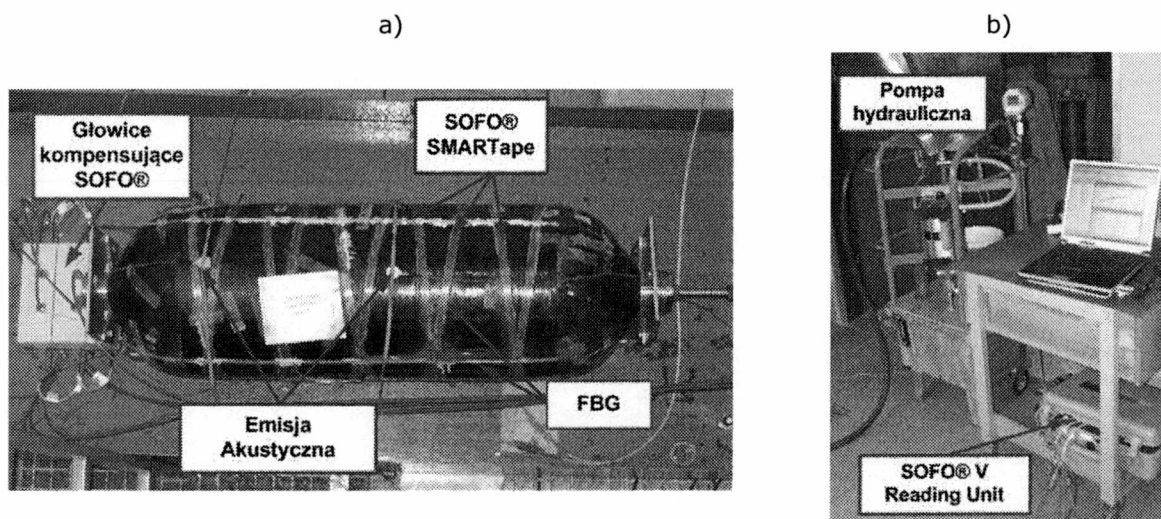
Każdy z naklejonych czujników typu SOFO posiadał dodatkową głowicę kompensującą wpływ zmian temperatury, umiejscowioną w pojemniku ochronnym, znajdującym się przy zbiorniku (co jest widoczne na Rys. 5.54b). W pierwszym etapie badań, na zbiorniku z zainstalowanymi powierzchniowo czujnikami wykonany został pomiar referencyjny (opisywany w dalszej części jako: Krok 1). Polegał on na obciążeniu zbiornika ciśnieniem statycznym w zakresie od 0 do 350 bar. Zrealizowany pomiar odkształceń stanowił poziom odniesienia dla dalszych badań i analiz [137]. Uzyskane wyniki pomiarowe przedstawione zostały poniżej na Rys. 5.55a.

Na Rys. 5.55b przedstawione zostało natomiast widmo odbiciowe pochodzące od czujników FBG dla różnych poziomów obciążeń zbiornika. Brak przesunięcia fali Bragga dla pików 2, 8 oraz 11 wynika z faktu, iż wymienione czujniki zastosowane zostały jako kompensacja temperaturowa dla pozostałych. Były one odseparowane mechanicznie od testowego zbiornika przy zachowaniu jedynie kontaktu termicznego.



Rys. 5.55. Referencyjny pomiar odkształceń czujnikami światłowodowymi w zakresie ciśnienia od 0 do 350 bar (a) oraz widmo odbiciowe od światłowodowych siatek Bragga (b) dla zbiornika bez zewnętrznych, programowanych defektów.

Zastosowany w badaniach układ testowy (zbiornik z zainstalowanymi czujnikami, pompa hydrauliczna oraz układ do rejestrowania odkształceń) przedstawione zostały na Rys. 5.56.

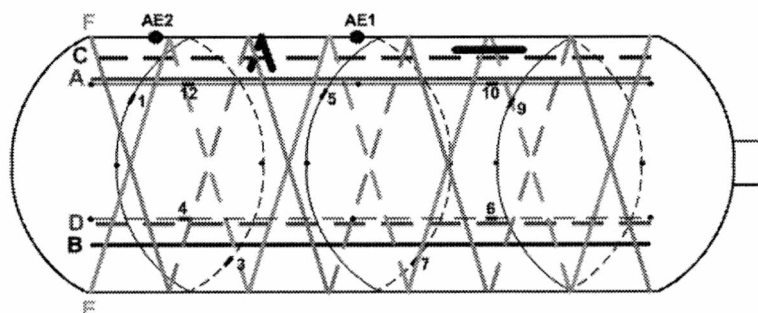


Rys. 5.56. Zbiornik testowy w komorze bezpieczeństwa (a) oraz stanowisko pomiarowe do zmiany ciśnienia wewnętrznego oraz pomiarów odkształceń metodami światłowodowymi (b).

W kolejnych etapach (Krok 2 ÷ Krok 4), w kompozytowej warstwie nośnej wykonane zostały kolejno defekty w postaci dwóch nacięć [18]:

- 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).

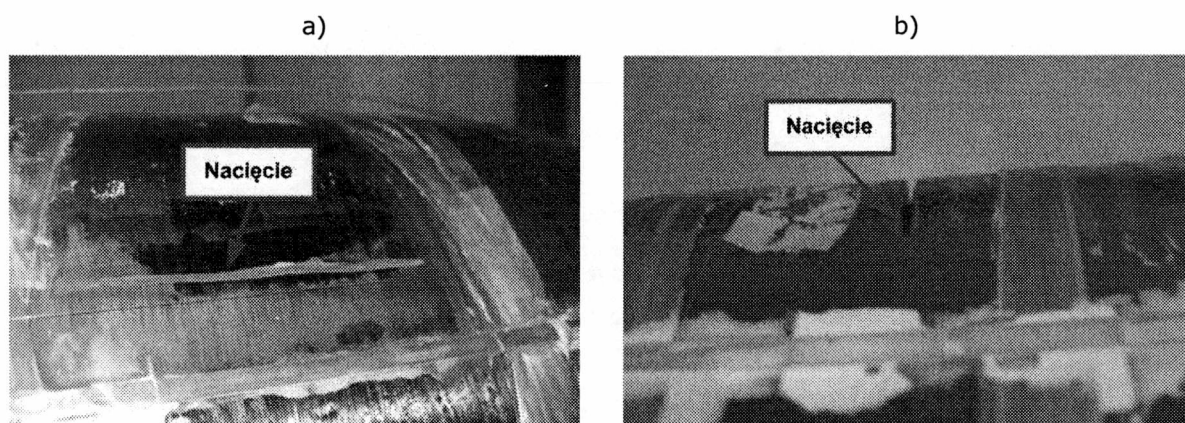
Rozmieszczenie defektów względem czujników przedstawiono na Rys. 5.57.



Rys. 5.57. Rozmieszczenie czujników i defektów programowanych na zbiorniku testowym;
 FBG: 4, 6, 10, 12 oraz SOFO: A, B, C, D – czujniki w kierunku wzdłużnym,
 FBG: 1, 3, 5, 7, 9 oraz SOFO: E, F – czujniki w kierunku obwodowym.

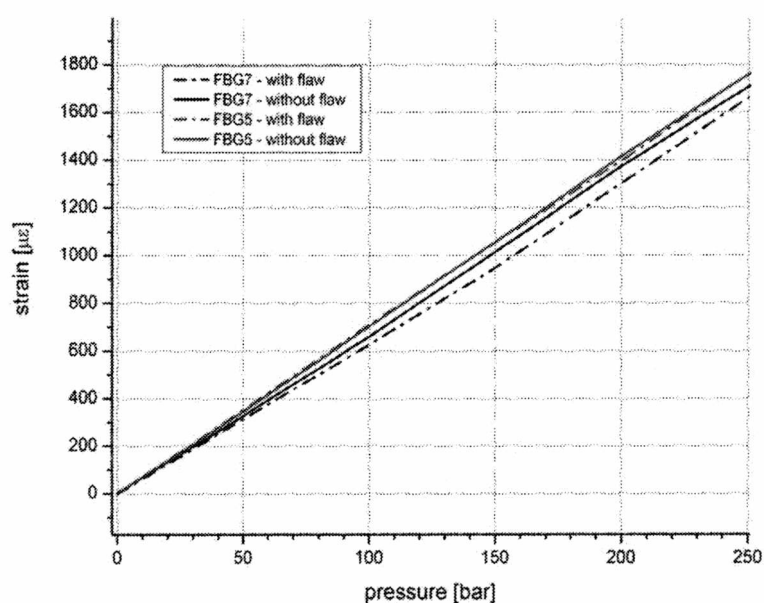
Głębokość wprowadzonych defektów (Rys. 5.58) stanowiła ok. 10÷20% grubości ścianki kompozytowej, co znacząco przekracza normy dla ciśnieniowych zbiorników prze-

znaczonych do gromadzenia wodoru [2]. 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 obejmuje zakres $20 \div 437,5$ bar).



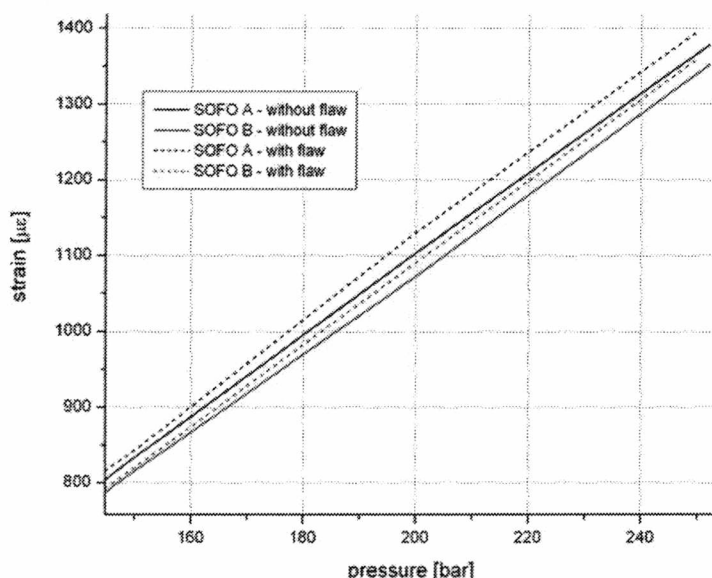
Rys. 5.58. Defekty w zbiorniku testowym: wzdłużny (a) oraz obwodowy (b).

Wprowadzenie programowanych defektów do kompozytowej warstwy nośnej zbiornika spowodowało zmiany w rozkładzie pola odkształceń, co zostało zarejestrowane przez zainstalowane czujniki. Zmianie ulegał kąt nachylenia krzywej odkształcenie-ciśnienie dla poszczególnych czujników, przy czym największe zmiany zarejestrowały czujniki zlokalizowanych w pobliżu nacięcia.



Rys. 5.59. Zmiana odkształceń obwodowych zbiornika w funkcji ciśnienia wewnętrznego, zarejestrowana przez światłowodowe siatki Bragga: FBG5 oraz FBG7 dla zbiornika bez oraz z defektem (Krok 2).

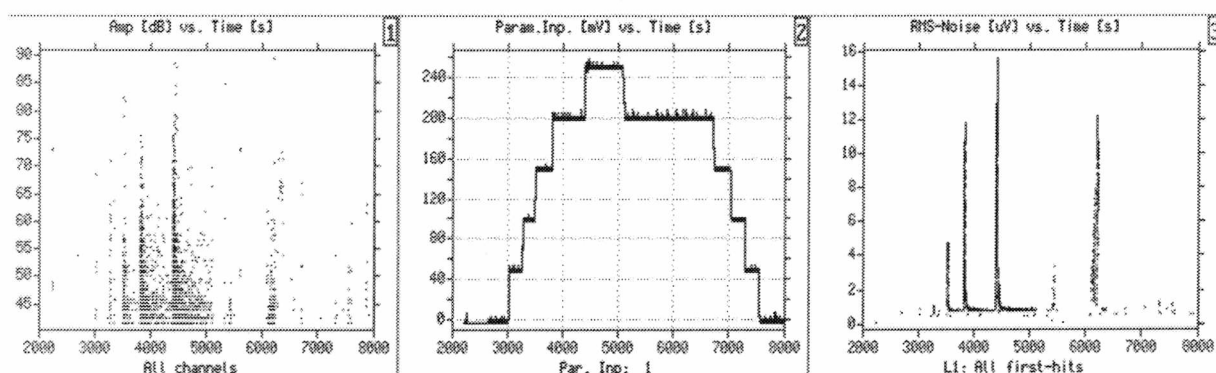
W przypadku defektu w kierunku wzdłużnym zbiornika (Krok 2) większą czułość wykazały czujniki zlokalizowane prostopadle do zbiornika. Na Rys. 5.59 przedstawiono przykładowe charakterystyki zmian odkształceń obwodowych zbiornika w funkcji narostu ciśnienia wewnętrznego zarejestrowane przez czujniki FBG5 oraz FBG7. Należy zauważyć, iż wprowadzenie programowanego defektu spowodowało zmianę kąta nachylenia prostej odkształcenie – ciśnienie, szczególnie widoczną dla FBG7.



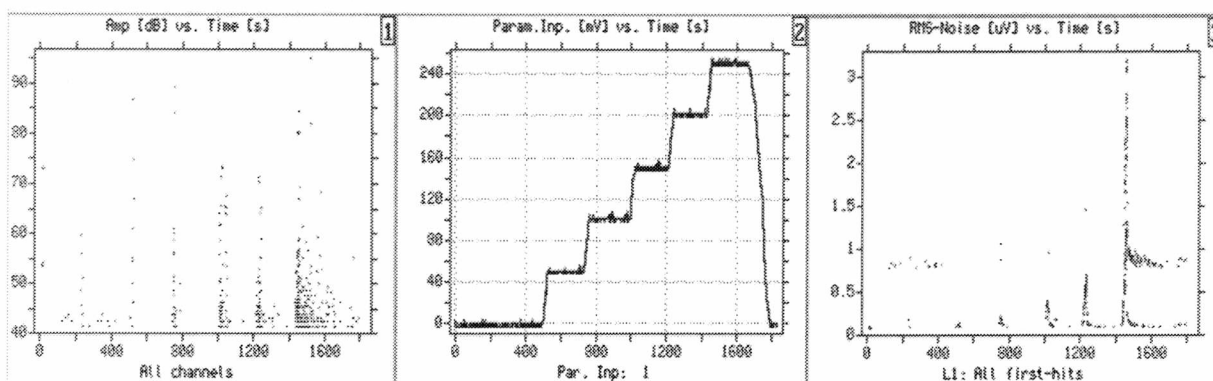
Rys. 5.60. Zmiana odkształceń wzdłużnych zbiornika w funkcji ciśnienia wewnętrznego, zarejestrowana przez czujniki SOFO A oraz SOFO B dla zbiornika bez oraz z defektem (Krok 3).

Jak już zostało wspomniane wcześniej w kolejnym etapie (Krok 3) wykonane zostało dodatkowe nacięcie kompozytowej warstwy nośnej zbiornika w kierunku obwodowym. Jak się można było spodziewać spowodowało to lokalną tendencję zbiornika do zginania, co zostało zarejestrowane przez czujniki zainstalowane w kierunku wzdłużnym (Rys. 5.60), m.in.: FBG4, SOFO A, SOFO B, SOFO C, a także czujnik zainstalowany w kierunku obwodowym – FBG7.

a)

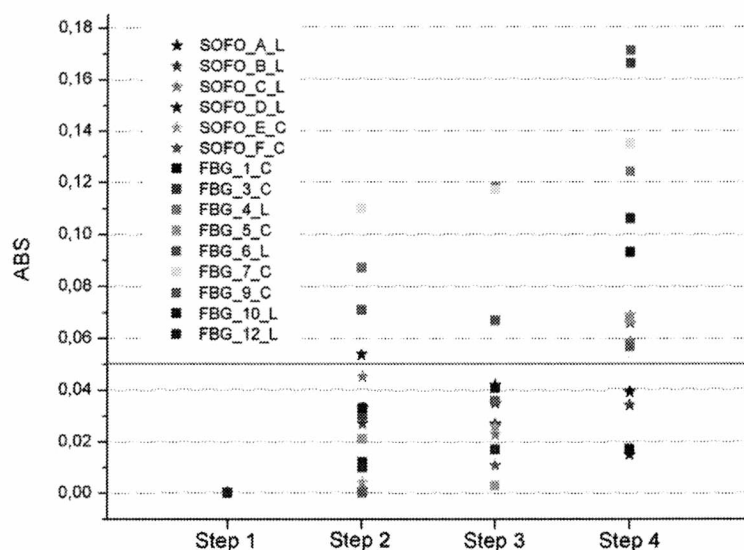


b)



Rys. 5.61. Zmiany sygnałów emisji akustycznej dla zbiornika z wprowadzonymi defektami programowanymi: Krok 2 (a) oraz Krok 3 (b); 1 – amplituda sygnałów akustycznych, 2 – zmiana ciśnienia w zbiorniku, 3 – sygnał RMS (wszystkie sygnały rejestrowane w funkcji czasu trwania eksperymentu).

W ostatnim kroku obydwa wprowadzone wcześniej defekty zostały powiększone (zwiększono głębokość nacięcia z ~ 2 mm do $\sim 4,5$ mm), co spowodowało jeszcze większą redystrybucję rejestrowanego pola odkształceń. Ponadto po wykonaniu każdego z nacięć, zaobserwowano wzrost amplitudy sygnałów rejestrowanych przez układ do pomiaru zdarzeń emisji akustycznej (Rys. 5.61).



Rys. 5.62. Analiza różnic odkształceń pomiędzy pomiarem referencyjnym (Krok 1) oraz pomiarami wykonanymi dla zbiornika z programowanymi defektami (Krok 2 ÷ Krok 3).

Powyżej na Rys. 5.62 przedstawiona została analiza porównawcza lokalnych odkształceń obwodowych oraz wzdłużnych wyznaczonych czujnikami światłowodowymi FBG oraz SOFO dla zbiornika bez defektu oraz z wprowadzonymi programowanymi nacięciami wykonanymi w warstwie kompozytowej. Podobnie jak wcześniej, analiza została przeprowa-

dzona zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 5.3, polegającą na wyznaczeniu „sztucznego” współczynnika ABS, definiowanego jako różnica współczynników kierunkowych dla prostych „odkształcenie – ciśnienie” wyznaczonych w pomiarze referencyjnym (zbiornik bez defektu) oraz kolejnym (zbiornik z nacięciami). Należy zauważyć, iż wprowadzenie pierwszego z defektów w kierunku wzdłużnym do struktury wysokociśnieniowego zbiornika (Krok 2), spowodowało zarejestrowane zakłócenie jednorodności w rozkładzie pola odkształceń na powierzchni zbiornika mierzonego w obydwu kierunkach, co przełożyło się bezpośrednio na zmianę wartości wyznaczonego współczynnika ABS. Jak już wspomniano wcześniej, największe zmiany zarejestrowane zostały przez czujnik umieszczony w kierunku prostopadłym do wprowadzonego defektu (w tym przypadku FBG7). W następnym etapie (Krok 3) wykonane zostało nacięcie w kierunku obwodowym, co wyraźnie wpłynęło na lokalnie mierzone odkształcenia wzdłużne, np. przez czujnik FBG4. W ostatnim kroku obydwa nacięcia pogłębiono, rejestrując wyraźne zmiany współczynnika ABS przez niemal wszystkie czujniki.

Przeprowadzone badania wykazały, iż czujniki FBG charakteryzowały się większą dynamiką i szybciej reagowały na wprowadzone niewielkie uszkodzenia warstwy kompozytowej. Jest to związane bezpośrednio z długością bazy pomiarowej stosowanych układów w porównaniu do rozmiarów nacięć. Czujniki FBG są znacznie krótsze, przez co mierzona wartość odkształceń jest związana ze stosunkowo małym obszarem zbiornika. Czujniki SOFO uśredniają mierzone wartości po całej swojej długości, co powoduje, że zmiany mierzonych sygnałów (odkształceń) są znacznie mniejsze, a tym samym wykrywane słabiej [137].

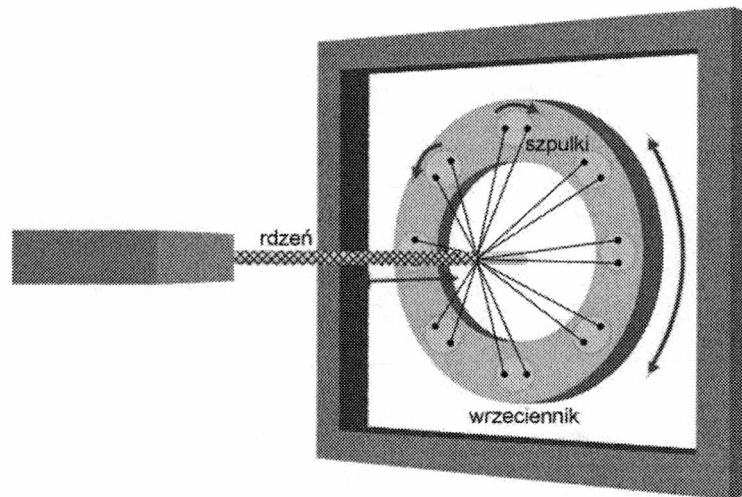
6 Zbiorniki wykonane metodą wyplotu włókna długiego z wbudowanymi czujnikami światłowodowymi

6.1 Opis metody wyplatania zbiorników z czujnikami światłowodowymi

Najczęściej stosowaną metodą wytwarzania zbiorników kompozytowych, wzmocnionych włóknem ciągłym, była technika wykorzystująca proces nawijania przesyconego żywicą rowingu bezpośrednio na rdzeń lub liner, a następnie utwardzania w podwyższonej temperaturze. Alternatywą metodą wytwarzania kompozytowych elementów ciśnieniowych jest technika wyplotu włókien ciągłych. Ta jeszcze młoda technologia oferuje m.in. dużą swobodę konstruowania, charakteryzującą się możliwością dopasowania ułożenia włókien do rodzaju i kierunku występującego obciążenia [142]. Różnica, w stosunku do metod nawijania, polega na pełnej automatyzacji procesu produkcji charakteryzującego się możliwością zmiany kąta ułożenia oraz rodzaju zbrojenia. W ostatnich latach techniki wyplotu są intensywnie rozwijane i osiągnęły już wysoki poziom technologicznej dojrzałości. Pełna automatyzacja procesu wytwórczego pozwala zredukować koszty, w stosunku do nawijania włókien ciągłych, nawet o połowę. W przypadku metody wyplatania, dzięki zastosowaniu ram wyplatających zintegrowanych z wieloosiowymi manipulatorami, możliwe jest wykonanie zbiorników ciśnieniowych nawet o średnicy lineru wynoszącej do 5000 mm oraz posiadających niesymetrycznie umieszczone króćce bez udziału pracy ręcznej [143, 118].

Metoda wyplatania jest prostym, a zarazem bardzo efektywnym procesem służącym do wytwarzania zamkniętych profili półfabrykatów bądź gotowych produktów z włókien ciągłych. Jej idea została przedstawiona na Rys. 6.1. 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 owalnych, prostokątnych jak również innych stało-przekrojowych kształtów, a w przypadku wyplatania trójosiowego możliwe jest wykonanie elementów o przekrojach niejednorodnych, gdzie proces przebiega równocześnie w trzech płaszczyznach [144].

Jednakże technologia wyplotu posiada również wady. Jedną z nich jest konieczność przeprowadzenia procesu infiltracji żywicą, z wykorzystaniem techniki próżniowej RTM (infuzji), a następnie utwardzania w podwyższonej temperaturze. Proces ten musi zostać przeprowadzony po etapie wyplatania. Alternatywnie, w trakcie procesu wyplatania można zastosować rowing termoplastyczny zintegrowany z żywicą, tzw. pre-preg. Redukuje to czas przeznaczony na przesycanie obiektu żywicą, jednak cena komponentów typu pre-preg jest znacząco wyższa, co znacząco wpływa na cenę końcową gotowego produktu.



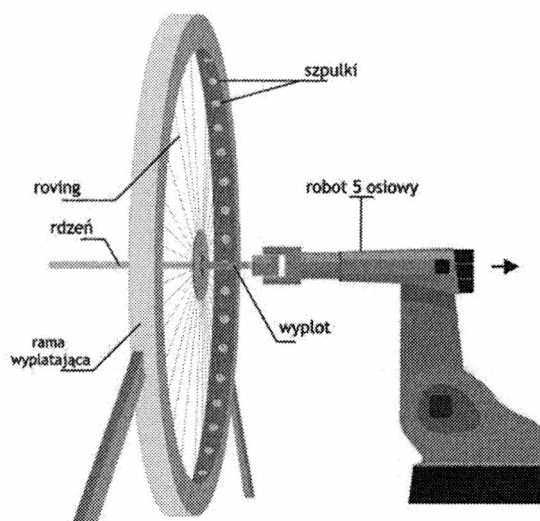
Rys. 6.1. Schemat procesu wyplatania tzw. preformy [142].

6.1.1 Proces wyplatania

W trakcie realizacji niniejszej pracy nawiązana została współpraca z Instytutem Lekkich Konstrukcji (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, ILK) w TU Dresden. Wynikiem współpracy było wytworzenie serii zbiorników wysokociśnieniowych wykonanych metodą wyplatania włókna długiego z zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi.

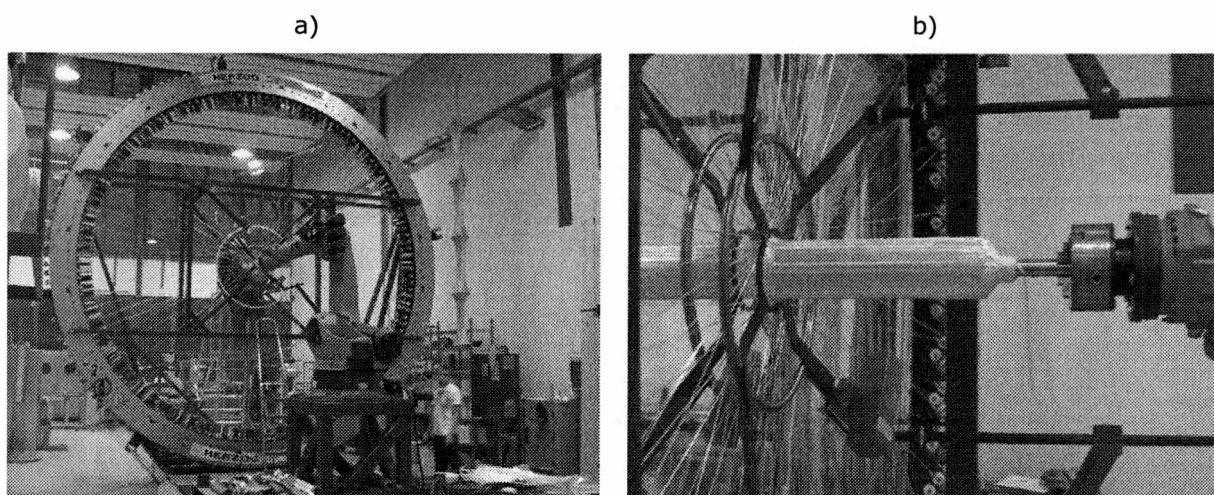
Jak już wspomniano, zbiorniki zostały wykonane za pomocą metody wyplatania włókien szklanych w laboratorium ILK, na wcześniej przygotowanych rdzeniach (linerach) z cienkiej blachy stalowej. Wymiary lineru wynosiły 900 mm długości oraz 116 mm średnicy. W procesie wyplatania zbiorników wykorzystywano 5-osiowego robota firmy KUKA oraz ramę wyplatającą firmy HERZOG 288-1, posiadającą 96 szpulek poruszających się po jej wewnętrznej stronie z pełną kontrolowalną prędkością. Kąt ułożenia włókien zależy od średnicy i szybkości posuwu rdzenia, jak również od prędkości obwodowej poruszających się szpulek. Możliwości manipulacyjne robota pozwalają dodatkowo na oplót elementów niesymetrycznych oraz zmianę kąta wyplotu w trakcie trwania procesu. Na Rys. 6.2 pokazano schemat ramy wyplatającej wraz z manipulatorem, natomiast na Rys. 6.3 zdjęcie stanowiska w laboratorium w TU Dresden oraz zbiornik w trakcie wyplatania. Proces wyplatania na rdzeniu stalowym przebiegał w następujących krokach:

- przygotowanie rdzenia stalowego,
- opracowanie programu sterującego manipulatorem oraz ramą wyplatającą (dobór prędkości posuwu rdzenia oraz poruszania się szpulek),
- wyplecenie 8 warstw wzmocnienia o kącie 54°.



Rys. 6.2. Schemat ramy wyplatającej wraz z manipulatorem [142].

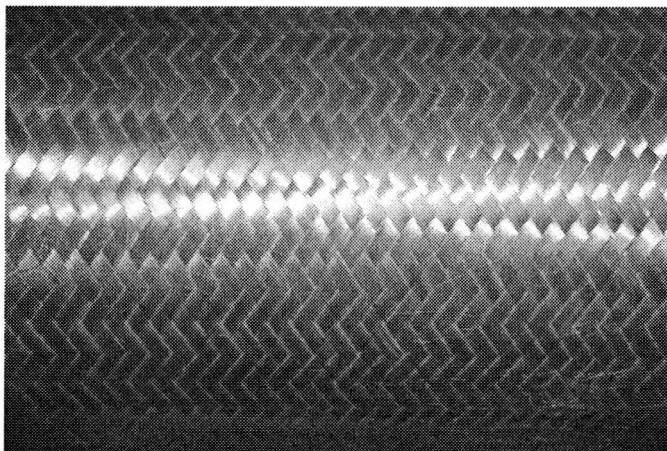
W procesie wykorzystano włókno szklane EC1200-315 firmy Oschatz o średnicy $17\ \mu\text{m}$ i wytrzymałości na rozciąganie $3400\ \text{N/mm}^2$ oraz module Younga $73000\ \text{N/mm}^2$. Dobór optymalnego kąta wyplotu dokonano na podstawie analizy literaturowej dostępnej z zakresu nawijania [120] oraz z przeprowadzonych symulacji wytrzymałościowych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych, przeprowadzanych przez współautorów z Drezna. Grubość naniesionych warstw wynosiła średnio ok. $3,5\ \text{mm}$, co pozwala wnioskować, że grubość jednej warstwy wynosiła ok. $0,4\ \text{mm}$.



Rys. 6.3. Rama wyplatająca firmy HERZOG wraz z manipulatorem KUKA (a) oraz zbiornik w trakcie procesu wyplatania włókna ciągłego (b) [104].

Zastosowanie pełnej automatyzacji procesu wyplatania pozwoliło uzyskać powtarzalne jakościowo warstwy wzmocnienia, charakteryzujące się jednorodnym, poprawnie ułożonym wzorem wyplotu (Rys. 6.4). Czas wyplotu jednej warstwy wzmocnienia wynosił ok. 7 minut. Zastosowana nowoczesna metoda wytwarzania prototypowych, wysokociśnie-

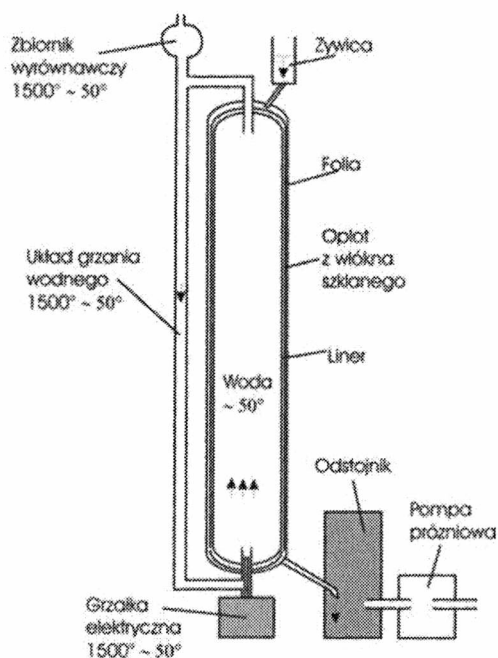
niowych zbiorników kompozytowych pozwoliła na wykonanie dobrego jakościowo materiału badawczego.



Rys. 6.4. Uzyskana struktura wyplecionego kompozytu (kąt wyplotu: 54°).

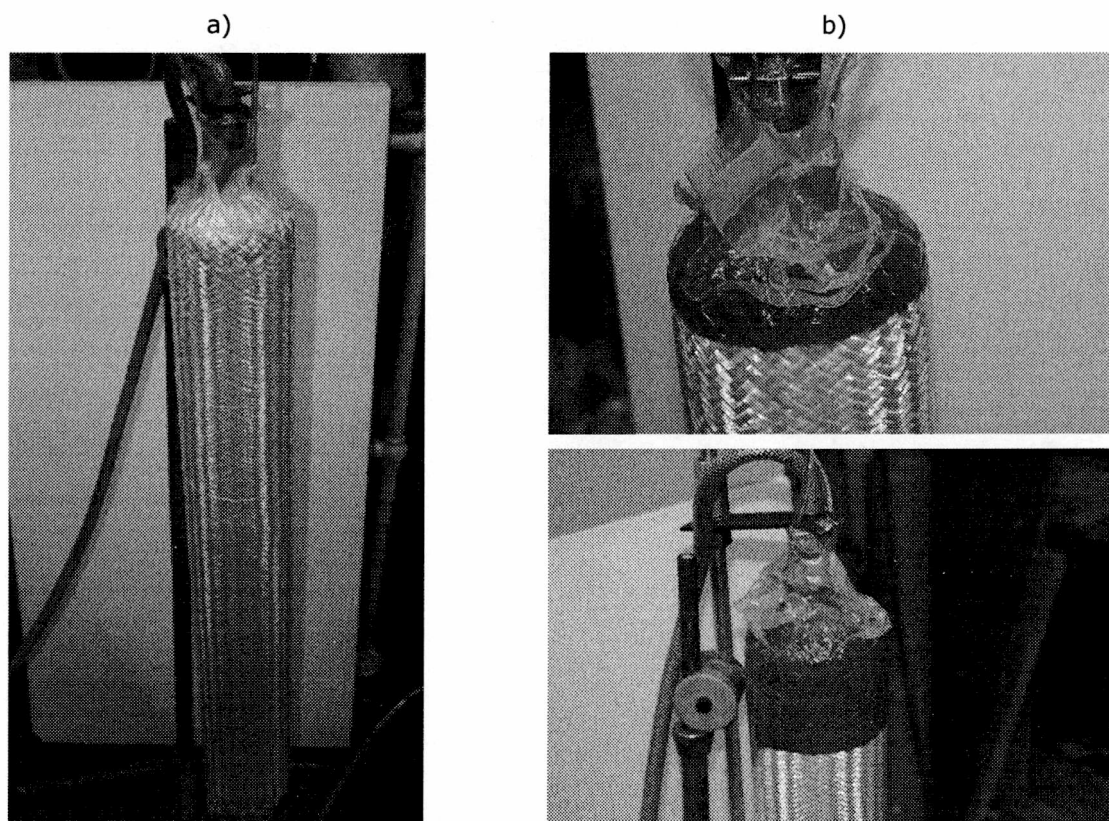
6.1.2 Proces infiltracji (przesycania)

Jak już zostało wspomniane, po etapie wyplatania zbiornika koniecznym było przesycenie rowingu szklanego żywicą. 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 oraz odстойnik i pompę próżniową (Rys. 6.5).

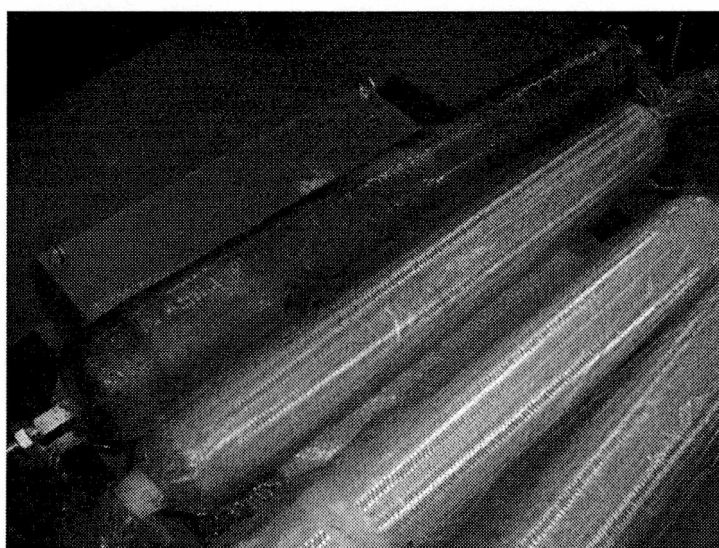


Rys. 6.5. Schemat procesu infiltracji zbiorników wysokociśnieniowych.

W celu utrzymania temperatury powyżej 40 °C układ zintegrowano z obiegiem wodnego grzania, składającego się z grzałki elektrycznej o mocy 1500 W, podgrzewającej wodę przepływającą przez zbiornik do temperatury 50 °C. Utrzymanie temperatury żywicy na odpowiednim poziomie ułatwiało proces jej przesycania przez rowing (wyższa temperatura to niższa lepkość żywicy). Widok stanowiska do infiltracji przedstawiono na Rys. 6.6.



Rys. 6.6. Stanowisko do infiltracji zbiorników (a) oraz proces przesycania (b).

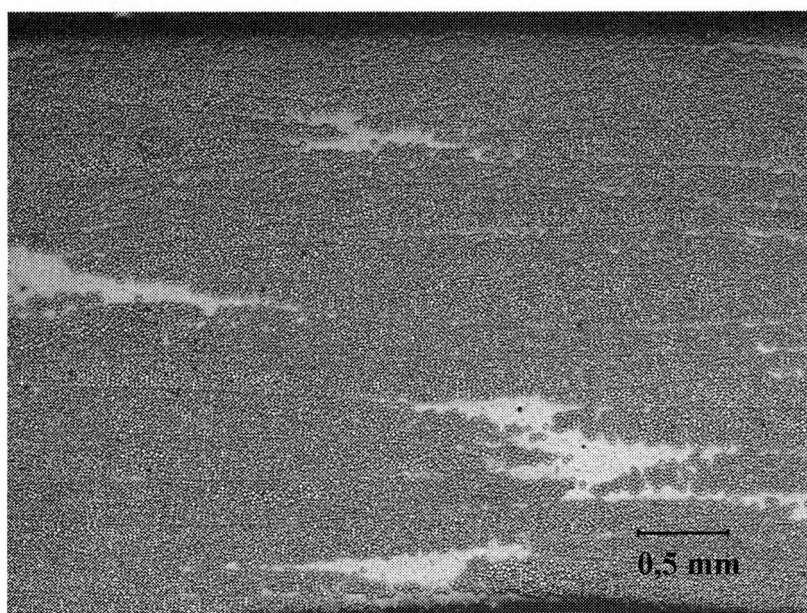


Rys. 6.7. Zbiorniki wysokociśnieniowe wykonane metodą wyplotu włókna ciągłego [119].

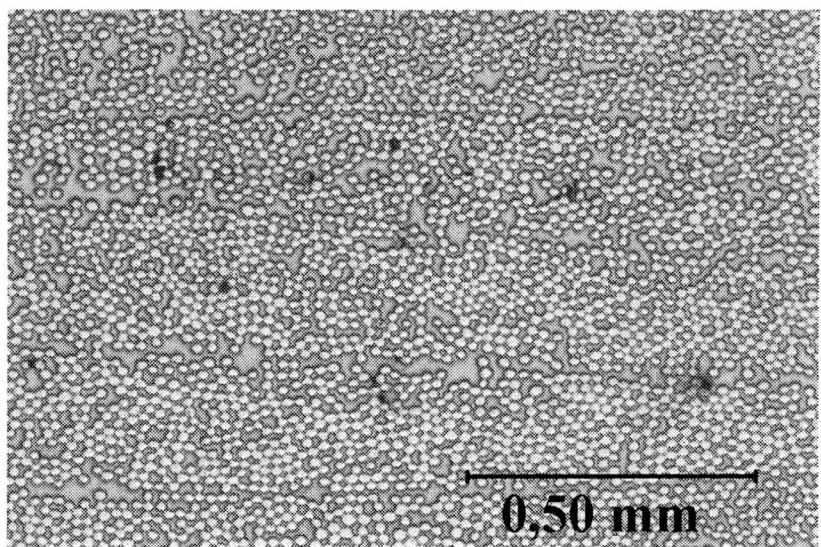
Czas procesu przesycania wynosił ok. 1 h, natomiast utwardzania – 24 godziny w 21 °C oraz dodatkowo 24 godziny w 80 °C. Przeinfiltrowany zbiornik wysokociśnieniowy oraz pozostałe zbiorniki przygotowane do procesu przesycania zostały pokazane na Rys. 6.7.

6.1.3 Ocena makroskopowa kompozytu wyplatane

Z jednego z wykonanych metodą wyplotu zbiorników wycięta została próbka o przekroju równoległym do tworzącej cylindra. Następnie próbka została pocięta na mniejsze kawałki i wypolerowana. Przykładowe uzyskane obrazy zglądów przedstawiono na Rys. 6.8 oraz Rys. 6.9. Należy zauważyć bardzo wysokie upakowanie włókien wzmocnienia w analizowanej próbce. Na Rys. 6.8, które przedstawia mniejsze powiększenie próbki, zauważyć można poszczególne pasma rowingu przeplatające się ze sobą, jak również pustki, w które wypełnione zostały nadmiarem żywicy. Metodą komputerowej analizy obrazu określono procentowy udział powierzchniowy wzmocnienia (73,7%) oraz matrycy (26,3%).



Rys. 6.8. Struktura materiału kompozytowego wykonanego metodą wyplotu włókna ciągłego oraz infiltracji (powiększenie x25).



Rys. 6.9. Struktura materiału kompozytowego wykonanego metodą wyplotu włókna ciągłego oraz infiltracji (powiększenie x50).

W następnym etapie próbka została zważona, później wypalona (w celu usunięcia żywicy) i ponownie zważona. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tab. 6.1. Wyznaczony w ten sposób udział wagowy wzmocnienia wynosił 68,8%, natomiast żywicy: 31,2%.

Tab. 6.1. Analiza wagowa próbki kompozytu wyciętej ze zbiornika wykonanego metodą wyplotu.

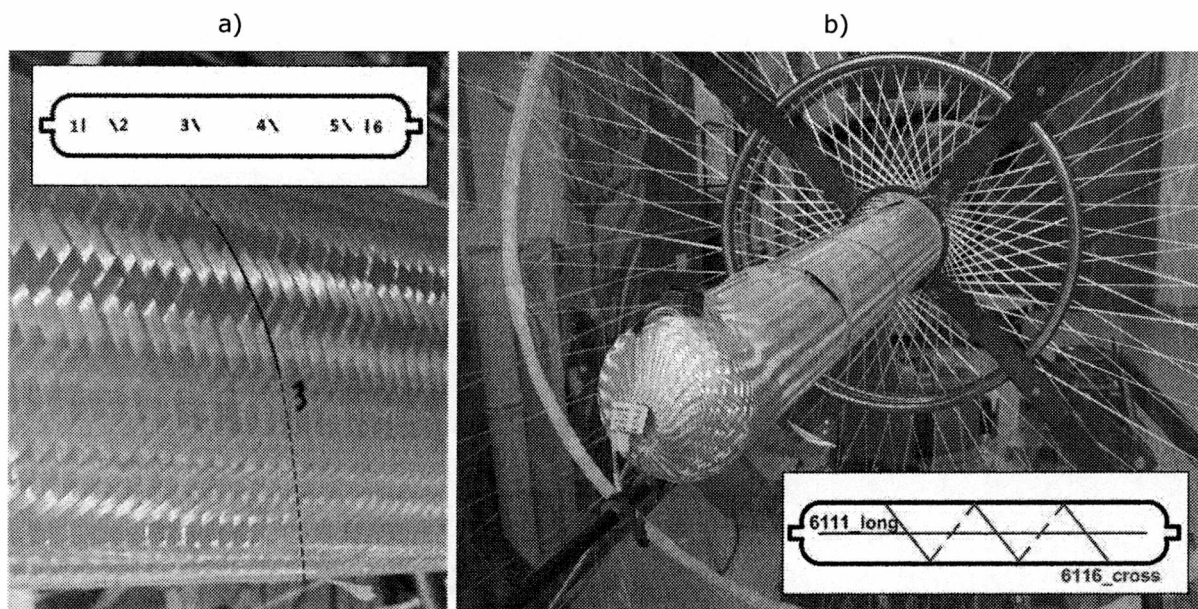
Masa próbki wyplatanej (żywica + rowing):	16.843 g
Masa próbki po wypaleniu (sam rowing):	11.586 g
Masa żywicy:	5.257 g
Udział procentowy (wagowo) wzmocnienia:	68.8%
Udział procentowy (wagowo) matrycy:	31.2%

6.2 Wytwarzanie zbiorników ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi

W trakcie procesu wyplatania zbiorników, pomiędzy warstwami 7. i 8. zainstalowane zostały dwa rodzaje czujników światłowodowych, przeznaczonych do pomiarów odkształceń. W badaniach zastosowano czujniki punktowe w postaci światłowodowych siatek Bragga (FBG) oraz światłowodowe czujniki interferometryczne o długich ramionach pomiarowych (SOFO). 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 Rys. 6.10a.

W trakcie wyplatania jednego ze zbiorników, pomiędzy dwiema ostatnimi warstwami zainstalowano dwa światłowodowe czujniki interferometryczne (tzw. SOFO SMARTape®

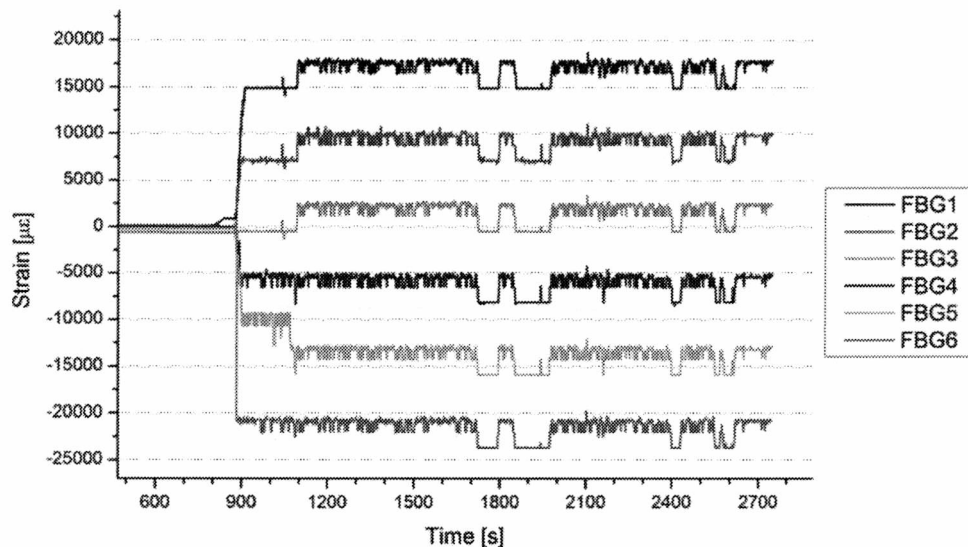
firmy Smartec). Każdy z nich miał długość 80 cm. Jeden z nich umożliwiał pomiary odkształceń w kierunku wzdłużnym (ozn. SOFO_6111_long), a drugi w kierunku obwodowym (ozn. SOFO_6116_cross). Czujniki te mają postać kompozytowych taśm wykonanych z włókna szklanego z umiejscowionym wewnątrz struktury światłowodem. Sposób ich rozmieszczenia przedstawiony został na Rys. 6.10b.



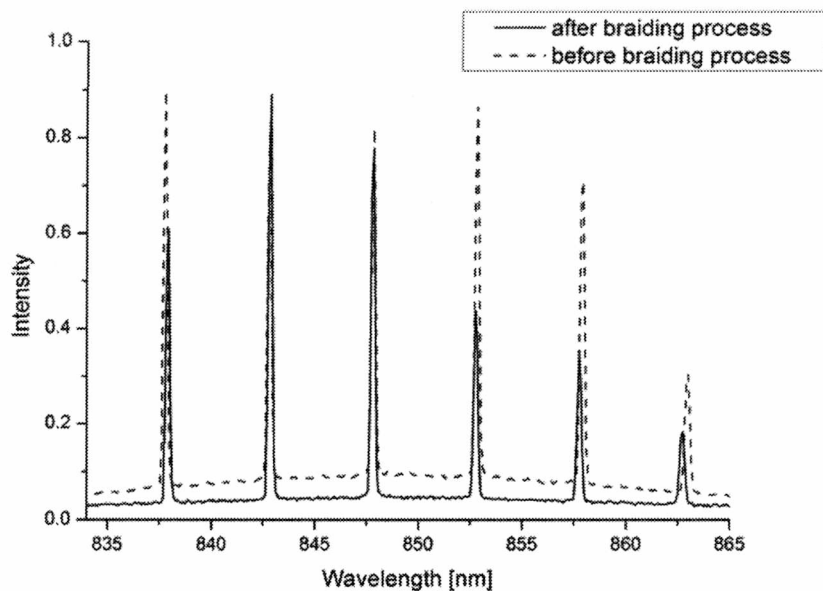
Rys. 6.10. Schemat rozmieszczenia czujników FBG oraz widok utkanej struktury z zainstalowanym czujnikiem FBG3 (a) oraz widok zbiornika w trakcie wyplatania z zainstalowanym na warstwie nr 7 czujnikami SOFO® (b) [104].

6.2.1 Monitorowanie procesu wyplatania zbiorników kompozytowych

Umieszczenie czujników światłowodowych wewnątrz struktury kompozytowej umożliwia pomiary właściwości mechanicznych kompozytu (tj. odkształcenia) już na etapie jego wytwarzania. Odkształcenia zarejestrowane w trakcie procesu wyplatania zbiornika z czujnikami FBG przedstawione zostały poniżej na Rys. 6.11. Można zauważyć, iż w trakcie wyplatania, odkształcenia przyjmują bardzo duże wartości i w zależności od lokalizacji mieszczą się w zakresie od -2,4% do 1,8%. Jednakże po procesie wyplatania zaczynają one stosunkowo szybko wracać do wartości początkowych. Efekt ten związany jest ze „sztucznie” wprowadzonym naciągiem do rowingu, wynikającym z technologii wytwarzania kompozytów z włókien długich. Wartość wstępnego naciągu włókien jednak spada po ustaniu ruchu wyplatarki, o czym świadczą wyniki przedstawione na Rys. 6.12 oraz zebrane w Tab. 6.2. Ze względu na zastosowaną technologię produkcji zbiornika, nie było możliwe monitorowanie procesu wyplatania do samego końca (konieczne było chwilowe zatrzymanie procesu oraz zabezpieczenie światłowodu wyprowadzającego sygnał z czujników FBG).



Rys. 6.11. Odształcenia czujników FBG zarejestrowane w trakcie wyplatania zbiornika.



Rys. 6.12. Widmo odbiciowe pochodzące od czujników FBG zainstalowanych w strukturze wyplatane-
nego zbiornika przed (ozn.: before braiding process) oraz po procesie produkcji (ozn.: after brai-
ding process).

Na Rys. 6.12 przedstawione zostało widmo odbiciowe pochodzące od czujników zainstalowanych w strukturze wyplatane-
go kompozytu przed procesem wyplatania ostatniej warstwy oraz po jego zakończeniu. Można zauważyć, że zmiany nie są już tak znaczące, jak miało to miejsce w trakcie wyplatania zbiornika, a przesunięcie spektrum odbiciowe-
go nie jest tak znaczące.

Analiza poszczególnych pików pochodzących od przetworników FBG pozwoliła wyzna-
czyć wartości lokalnych odkształceń po zakończonym procesie wyplatania (Tab. 6.2).
Można zauważyć, iż czujniki, które zlokalizowane były bliżej głowicy wyplatającej w po-

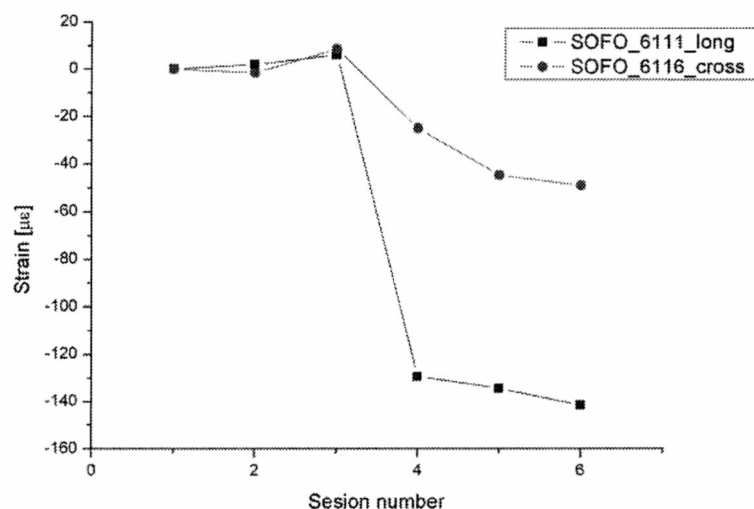
czątkowym okresie produkcji (FBG4, FBG5, FBG6), zarówno w trakcie wyplatania (Rys. 6.11) jak i po jego zakończeniu, były ściskane, natomiast czujniki FBG1, FBG2 oraz FBG3 zachowywały się zupełnie odmiennie (były rozciągane). Należy zauważyć, iż maksymalne amplitudy zmian odkształceń były na krańcach zbiornika (FBG1, FBG5 oraz FBG6).

Przeprowadzone pomiary wykazały, iż w trakcie procesu wyplatania zbiornika lokalnie mogą powstawać obszary o nie naprężonym wstępnie włóknie wzmocnienia (obszary o dodatnim znaku odkształceń, gdzie może dochodzić do tzw. ondulacji włókna). Może mieć to negatywny wpływ na wytrzymałość ciśnieniową zbiornika.

Tab. 6.2. Zmiana długości fal Bragga oraz odkształceń zarejestrowana przez czujniki FBG po procesie wyplatania zbiornika.

	FBG1	FBG2	FBG3	FBG4	FBG5	FBG6
$\Delta\lambda$ [nm]	152	67	17	-103	-187	-188
Strain [$\mu\epsilon$]	238	105	27	-161	-292	-294
	rozciąganie	rozciąganie	rozciąganie	ściskanie	ściskanie	ściskanie

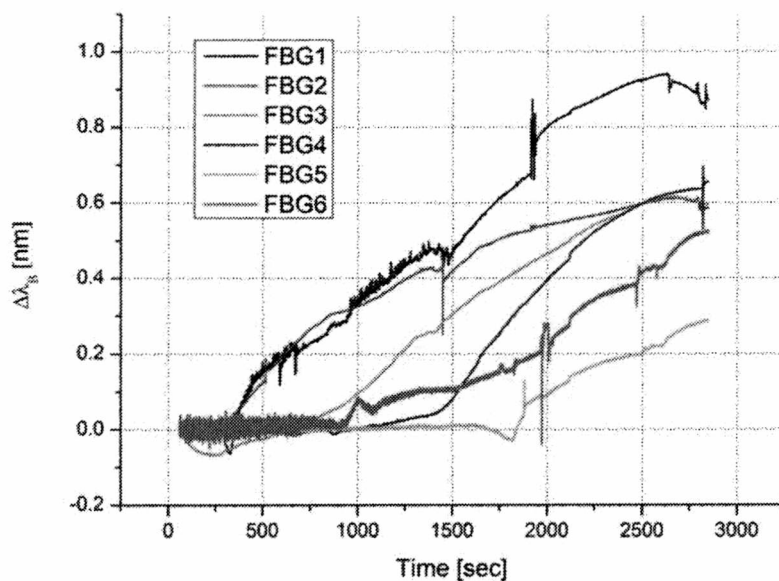
Podobne zmiany w odkształceniach zaobserwowane zostały również dla zbiornika wyplatanego z czujnikami interferometrycznymi SOFO. Na Rys. 6.13 pokazane zostały zmiany odkształceń wzdłużnych i obwodowych przed (sesje pomiarowe: 1÷3) oraz po procesie wyplatania zbiornika z czujnikami (sesje: 4÷6). Można zauważyć, iż obydwa czujniki (obwodowy i wzdłużny) zostały w trakcie procesu wyplatania ściskane, a zarejestrowane zmiany odkształceń były równe odpowiednio -141 $\mu\epsilon$ oraz -49 $\mu\epsilon$. W porównaniu do światłowodowych siatek Bragga, zastosowane czujniki interferometryczne SOFO charakteryzują się znacznie dłuższą bazą pomiarową. Dlatego też trzeba mieć świadomość, że uzyskane wartości odkształceń stanowią wartość średnią zmierzoną na całej swojej długości.



Rys. 6.13. Zmiany odkształceń wzdłużnych (long) i obwodowych (cross) przed oraz po procesie wyplatania zbiornika z czujnikami interferometrycznymi.

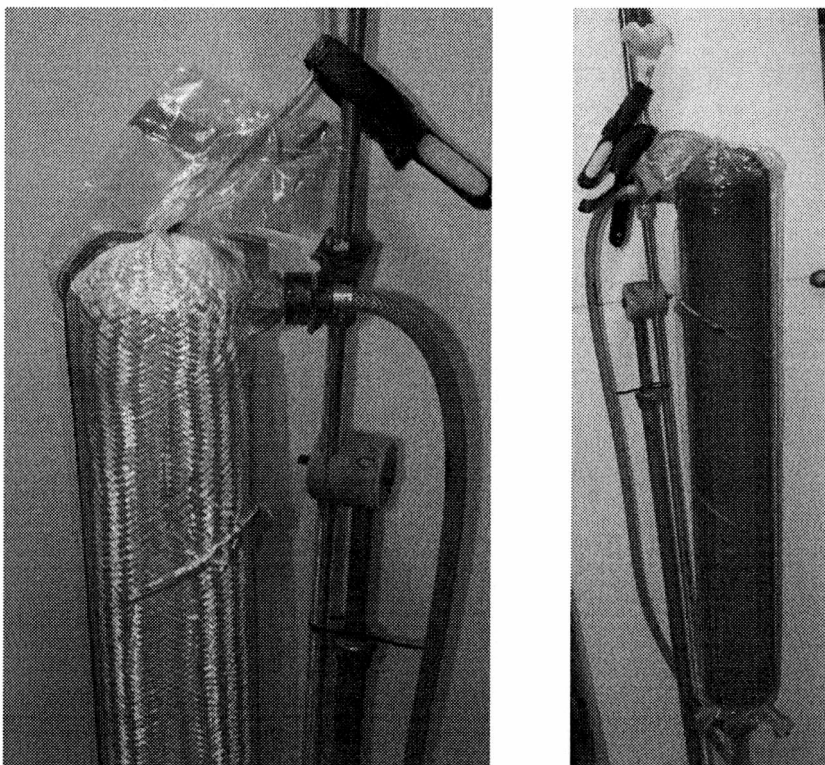
6.2.2 Monitorowanie procesu infiltracji

Zintegrowanie światłowodowych czujników FBG ze strukturą wyplatane kompozytu pozwoliło także na monitorowanie procesu infiltracji. Uzyskane wyniki pomiarów zmiany długości fali Bragga pochodzącej od wszystkich przetworników FBG zaprezentowano poniżej (Rys. 6.14). Jako że zbiornik nie był obciążony ciśnieniem wewnętrznym, dlatego też można założyć, że całkowite przesunięcie fali Bragga związane jest ze zmianą lokalnej temperatury zbiornika. Żywica epoksydowa, która powoli przesyciła kolejne obszary zbiornika powodowała wzrost temperatury.



Rys. 6.14. Zmiana długości fali Bragga (λ_B) w trakcie procesu infiltracji zbiornika wyplatane.

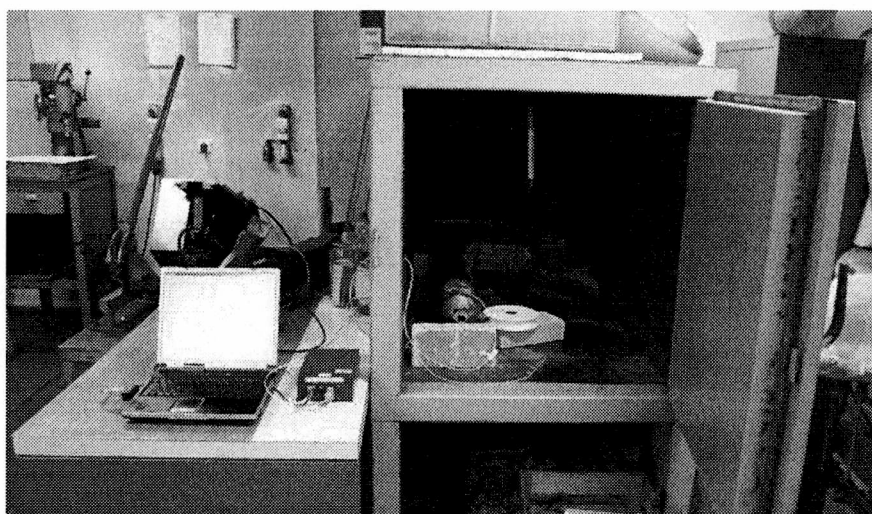
Na Rys. 6.14 można zauważyć, iż w początkowej fazie procesu przesycony zostały obszar w okolicach czujników FBG1 oraz FBG2, następnie FBG3 oraz niemal równolegle FBG4 i FBG6. Jako ostatni został przesycony obszar zbiornika z czujnikiem FBG5. Na Rys. 6.15 przedstawione zostały zdjęcia zbiornika wyplatanego ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi w trakcie procesu infiltracji.



Rys. 6.15. Infiltracja zbiornika ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi.

6.2.3 Monitorowanie procesu utwardzania żywicy

Po procesie infiltracji zbiornik został (zgodnie z wymaganiami producenta żywicy) utwardzany przez 24 godziny w temperaturze otoczenia, a następnie umieszczony w komorze klimatycznej i wygrzewany przez kolejną dobę w temperaturze 80 °C (Rys. 6.16). W komorze klimatycznej ulokowany został dodatkowy czujnik FBG, który zastosowany został do pomiaru temperatury. Dzięki temu możliwym było odseparowanie wpływu temperatury na czujniki FBG wbudowane w strukturę wyplatanego kompozytu i umożliwiło wyznaczenie rzeczywistych odkształceń konstrukcji pochodzących od zmian temperatury. Proces wygrzewania oraz zmiany lokalnych odkształceń zbiornika, zarejestrowanych przez światłowodowe siatki Bragga wbudowane w strukturę jego ścianki kompozytowej, przedstawiony został poniżej na Rys. 6.17.



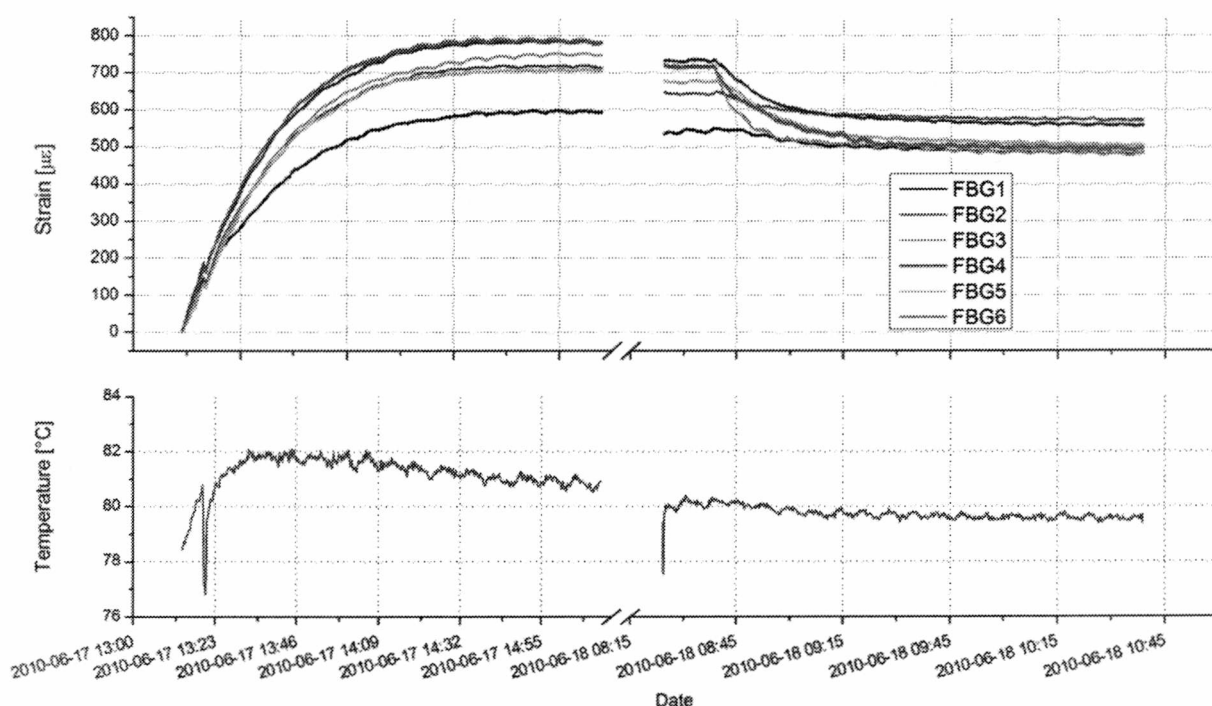
Rys. 6.16. Komora klimatyczna do wygrzewania (utwardzania) zbiorników.

Na przedstawionym wykresie można zauważyć niewielkie zmiany w rejestrowanych wartościach odkształceń pomiędzy poszczególnymi czujnikami FBG. W pierwszym etapie wygrzewania zbiornika w komorze, największe zmiany zarejestrował czujnik FBG6, natomiast najmniejsze – FBG1. Wynika to z ułożenia zbiornika względem komory termicznej oraz nierównomiernego rozkładu temperatury wzdłuż jej długości. Ze względu na rozmiary zbiornika, nie było możliwości ułożenia go w poprzek komory. Natomiast w przypadku ułożenia go wzdłuż, koniec zbiornika, na którym zlokalizowany był czujnik FBG6, znajdował się bliżej grzałek, co automatycznie wpływało na lokalne zwiększenie temperatury, a tym samym i lokalnych odkształceń zbiornika. Uśredniona zmiana temperatury, rejestrowana przez dodatkowy czujnik FBG, umieszczony w pobliżu zbiornika w komorze termicznej, przedstawiona została na dolnym wykresie na Rys. 6.17. Po zakończeniu procesu utwardzania w temperaturze 100 °C (24h), grzanie zostało wyłączone, a zbiornik poddany procesowi powolnego chłodzenia.

Jak już wspomniano wcześniej, przed procesem właściwego utwardzania, zbiornik został wstępnie utwardzony w temperaturze pokojowej. W trakcie tego procesu, przesycony żywicą kompozyt nie uzyskał swoich końcowych parametrów wytrzymałościowych (zbiornik był jeszcze miękki, a żywica była jedynie żelowana).

Proces wygrzewania w wysokiej temperaturze pozwolił na całkowite utwardzenie żywicy, wywołując równocześnie niewielkie naprężenia ściskające (widoczna zmiana poziomów odkształceń przedstawionych na Rys. 6.17 w trakcie 24-godzinnego wygrzewania). Maksymalna zmiana została zarejestrowana przez czujniki: FBG2 oraz FBG6 (odpowiednio: $-67 \mu\epsilon$ oraz $-64 \mu\epsilon$). Średnia wartość lokalnych odkształceń ściskających wynosiła ok. $-51 \mu\epsilon$. Uwzględniając uśrednioną zmianę temperatury w trakcie trwania procesu wygrzewania (ok. 1 °C) oraz współczynniki czułości odkształceniowej (K_ϵ) oraz czułości temperaturowej (K_T) dla zastosowanych przetworników FBG (odpowiednio: 0,64 pm/ $\mu\epsilon$ oraz

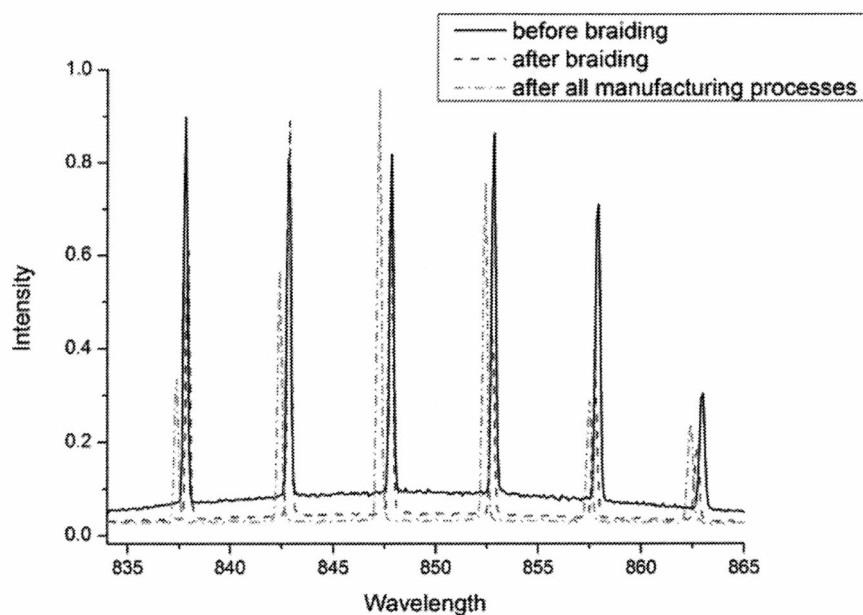
6,8 pm/°C), to można przyjąć, że rzeczywiste wartości lokalnych odkształceń ściskających (bez wpływu temperatury) są większe o ok. 11 $\mu\epsilon$ i wynoszą -40 $\mu\epsilon$.



Rys. 6.17. Zmiana odkształceń zbiornika wyplatanego oraz temperatury w komorze termicznej w trakcie procesu utwardzania.

Należy podkreślić, iż przedstawiona zmiana odkształceń jest związana przede wszystkim z rozszerzalnością termiczną stalowego lineru. Współczynnik rozszerzalności liniowej α_T dla stali wynosi 11,5 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$, zatem przy zmianie temperatury o 60 $^\circ\text{C}$, zmiana odkształceń zbiornika (lineru) związana tylko ze zmianą temperatury wynosi ok. 690 $\mu\epsilon$.

Na Rys. 6.18 przedstawione zostało widmo odbiciowe pochodzące od czujników FBG zintegrowanych ze strukturą wyplecionej powłoki kompozytowej zbiornika, zarejestrowane tuż przed rozpoczęciem badań ciśnieniowych, czyli po ukończeniu wszystkich procesów produkcyjnych (wyplatanie, infiltracja, utwardzanie, chłodzenie). Należy zauważyć, iż fale Bragga pochodzące od wszystkich czujników przesunęły się w stronę niższych wartości, w stosunku do swoich wartości początkowych (przed instalacją na zbiorniku). Oznacza to, że każdy z zainstalowanych czujników uległ lokalnie niewielkiemu ściskaniu.



Rys. 6.18. Widmo odbiciowe pochodzące od czujników FBG zarejestrowane przed wyplataniem zbiornika (ozn.: before braiding) oraz po jego wypleceniu (ozn.: after braiding), jak również po ukończeniu wszystkich procesów wytwarzania (ozn.: after all manufacturing processes).

Zarejestrowane wartości odkształceń przedstawiono poniżej w Tab. 6.3. Można założyć, iż po zakończeniu wszystkich procesów związanych z produkcją badanego zbiornika, rozkład pola odkształceń stał się znacznie bardziej jednorodny, w porównaniu do analiz wykonanych w trakcie wytwarzania zbiornika, a różnice w zarejestrowanych odkształceniach są znacznie mniejsze.

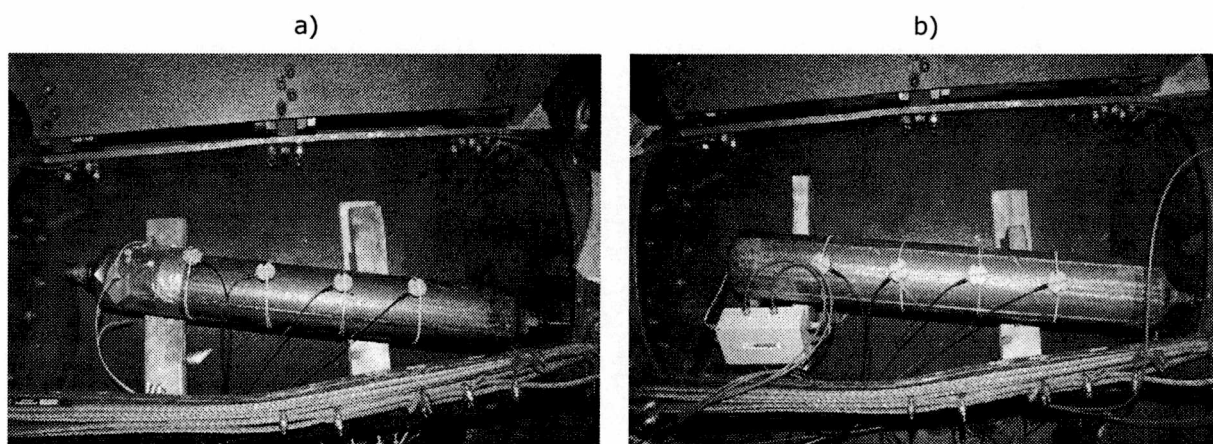
Tab. 6.3. Zmiana długości fal Bragga oraz odkształceń zarejestrowana przez czujniki FBG po zakończonym procesie produkcji zbiornika wyplatanego.

	FBG1	FBG2	FBG3	FBG4	FBG5	FBG6
$\Delta\lambda$ [pm]	-428	-431	-581	-420	-397	-569
Strain [$\mu\epsilon$]	-669	-673	-908	-656	-620	-889
	ściskanie	ściskanie	ściskanie	ściskanie	ściskanie	ściskanie

6.3 Badania quasi-statyczne zbiorników wyplatanych

W celu sprawdzenia parametrów mechanicznych zbiorników wykonanych metodą wyplotu włókna ciągłego oraz poprawności pracy czujników światłowodowych, które umiejscowione zostały w ich kompozytowej powłoce nośnej, przeprowadzona została seria badań quasistatycznych. W tym celu testowe zbiorniki zostały wypełnione cieczą roboczą (wodą), następnie umiejscowione w komorze bezpieczeństwa i podłączone do pomy ci-

śnieniowej, opisanej w podrozdziale 5.2.2. Dodatkowo, na powierzchni zbiorników zainstalowane zostały czujniki emisji akustycznej (EA), które rejestrowały zdarzenia akustyczne pochodzące od badanych obiektów. W trakcie próby zwiększano ciśnienie robocze w zbiorniku, aż do momentu, kiedy sygnały z EA dawały informację o wysokim stopniu zdegradowania powłoki kompozytowej. Autorom badań zależało, aby nie doprowadzić do rozerwania butli. Widok badanych zbiorników w komorze bezpieczeństwa przedstawiony został na Rys. 6.19.

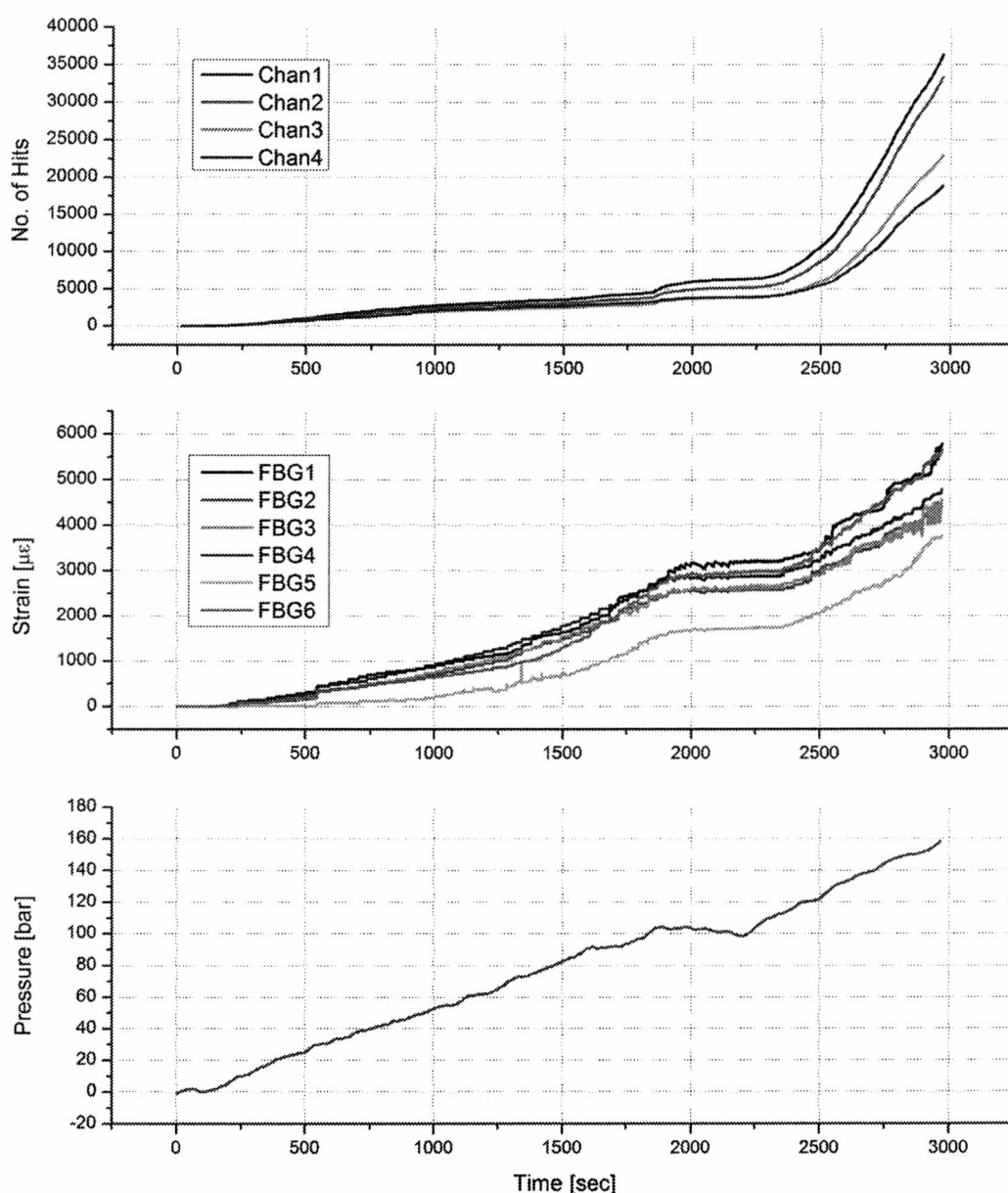


Rys. 6.19. Kompozytowe zbiorniki wykonane metodą wyplotu włókna ciągłego ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi typu FBG (a) oraz SOFO® (b), w trakcie badań quasistatycznych.

Na Rys. 6.20 przedstawione zostały wyniki pomiarów uzyskane dla zbiornika ze zintegrowanymi czujnikami FBG. Wykresy przedstawiają sygnały zarejestrowane przez przetworniki emisji akustycznej w postaci liczby zdarzeń akustycznych pochodzących od badanego zbiornika, zmianę lokalnych odkształceń rejestrowanych przez poszczególne światłowodowe siatki Bragga oraz przyrost ciśnienia wewnętrznego w trakcie trwania próby. Należy zauważyć dobrą korelację pomiędzy sygnałami zarejestrowanymi przez czujniki emisji akustycznej (liczba zdarzeń EA), a sygnałami pochodzącymi z czujników światłowodowych (lokalne odkształcenia). Wraz ze wzrostem ciśnienia wewnętrznego wzrastają zarówno deformacje powłoki kompozytowej, jak i sygnały EA. Świadczy to o rosnącym zdefektowaniu kompozytowej warstwy nośnej badanego zbiornika. Maksymalne wartości lokalnych odkształceń zmierzone zostały przez czujniki FBG1 oraz FBG6, które umiejscowione zostały w kierunku prostopadłym do osi głównej zbiornika. Dla ciśnienia maksymalnego (rzędu 160 barów) wynosiły odpowiednio $5770 \mu\epsilon$ oraz $5645 \mu\epsilon$. Wartości lokalnych odkształceń, zarejestrowane w kierunku zgodnym z kierunkiem wyplotu rowingu (54°), były mniejsze i zmieniały się w przedziale od $4420 \mu\epsilon$ do $4765 \mu\epsilon$ dla czujników FBG2÷FBG4. Najmniejsze zmiany ($\sim 3760 \mu\epsilon$) zmierzone zostały przez czujnik FBG5. Uzyskane wyniki pomiarowe pokazują w miarę jednorodny rozkład pola odkształceń rejestrowanych w strukturze zbiornika w poszczególnych kierunkach. Wyją-

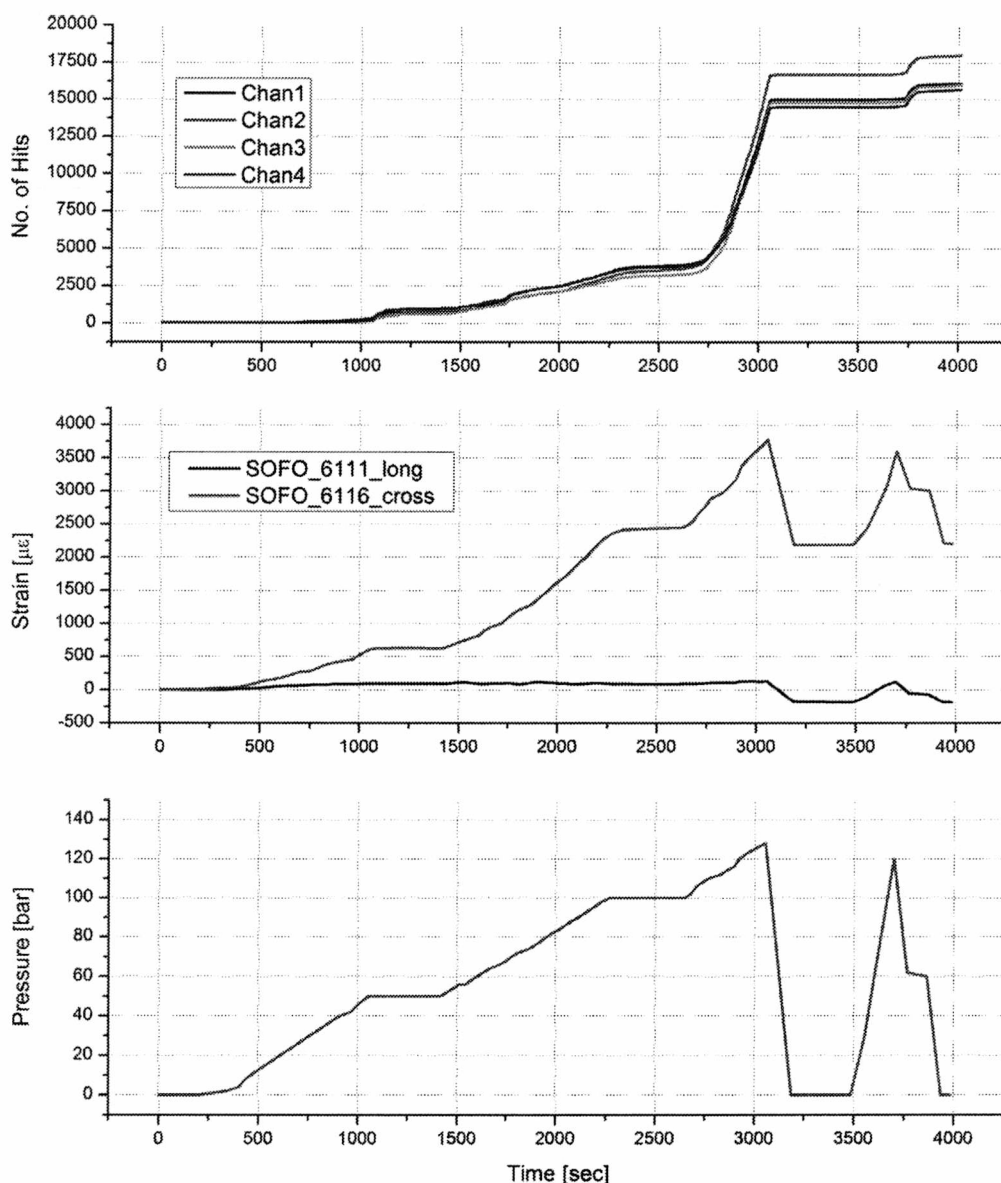
tek stanowi wspomniany czujnik FBG5. Istniejąca różnica w mierzonych wartościach odkształceń może być związana ze zmianą początkowego położenia światłowodu w trakcie procesu wyplatania i jego przemieszczeniu w kierunku osi głównej zbiornika.

Analiza sygnałów pochodzących od czujników emisji akustycznej pozwoliła zaobserwować w miarę liniowy wzrost rejestrowanych zdarzeń akustycznych (oznaczonych na wykresie jako No. of Hits) oraz odkształceń do ciśnienia ok. 110 barów. Po jego przekroczeniu następował gwałtowny wzrost liczby zdarzeń emisji akustycznej, a ponadto charakterystyka odkształceń zmieniła kąt nachylenia.



Rys. 6.20. Wyniki badań ciśnieniowych (próba quasistatyczna) zbiornika wyplatanego z czujnikami FBG: liczba zdarzeń zarejestrowanych przez cztery czujniki emisji akustycznej (wykres górny), odkształcenia zarejestrowanych przez czujniki FBG (wykres środkowy) oraz zmiana ciśnienia wewnętrznego w trakcie trwania eksperymentu (wykres dolny).

Podobne wyniki pomiarowe uzyskane zostały dla zbiorników ze zintegrowanymi czujnikami interferometrycznymi SOFO® (Rys. 6.21). Zbiornik ten obciążany był ciśnieniem wewnętrznym dwukrotnie: od 0 do 130 barów, a następnie od 0 do 120 barów.

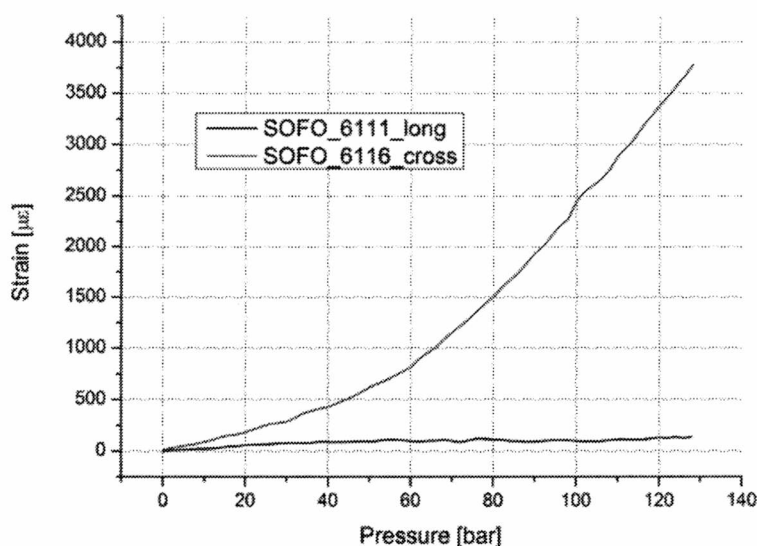


Rys. 6.21. Wyniki badań ciśnieniowych (próba quasistatyczna) zbiornika wyplatanego z czujnikami interferometrycznymi SOFO: liczba zdarzeń zarejestrowanych przez cztery czujniki emisji akustycznej (wykres górny), odkształcenia zarejestrowanych przez czujniki SOFO (wykres środkowy) oraz zmiana ciśnienia wewnętrznego w trakcie trwania eksperymentu (wykres dolny).

Podobnie, jak miało to miejsce w pierwszym analizowanym przypadku, również tutaj, wraz ze wzrostem ciśnienia wewnętrznego wzrasta liczba rejestrowanych zdarzeń emisji akustycznej oraz odkształceń. Ze względu na rodzaj zastosowanego czujnika światłowodowego (o długości ramion pomiarowych równej 80 cm), wartości odkształceń uśredniane były po całej długości czujnika. Maksymalne wartości odkształceń rejestrowanych

w kierunku zgodnym z ułożeniem włókien wzmocnienia dla ciśnienia 130 barów wynosiły 3780 $\mu\epsilon$. Odształcenia w kierunku 54°, rejestrowane przez czujniki FBG dla analogicznej wartości ciśnień, wynosiły od 3090 $\mu\epsilon$ do 3470 $\mu\epsilon$ (dla FBG2÷FBG4). Niewielka różnica odształceń, zmierzona pomiędzy różnymi zbiornikami, świadczy o dobrej powtarzalności procesu produkcyjnego zbiorników.

Wartości zarejestrowanych odształceń wzdłużnych były znacznie mniejsze i dla badanego zbiornika osiągnęły maksymalną wartość rzędu 150 $\mu\epsilon$. Jak już wspomniano, zbiornik z czujnikami SOFO® obciążany był dwukrotnie. Po zmniejszeniu ciśnienia w zbiorniku (do 0 bar), czujniki światłowodowe zarejestrowały znaczące wartości odształceń reszkowych (związanych z pierwotną degradacją struktury kompozytu w trakcie pierwszego obciążania). Odształcenie w kierunku zgodnym z orientacją wzmocnienia wynosiły ok. 2200 $\mu\epsilon$ (czyli ponad 0,2.%). W następnym cyklu ciśnieniowym (do 120 bar) maksymalne wartości odształceń wynosiły 3600 $\mu\epsilon$, jednakże rzeczywista amplituda zmian była znacznie mniejsza (1400 $\mu\epsilon$). Po ponownym odciążeniu zbiornika rejestrowane wartości odształceń wróciły do „nowych” wartości początkowych (do wartości odształceń reszkowych).



Rys. 6.22. Zmiana odkształceń zbiornika wyplatanego z czujnikami SOFO® w funkcji ciśnienia wewnętrznego.

Powyżej na Rys. 6.22 pokazana została zmiana odkształceń zbiornika rejestrowana przez czujniki SOFO® w trakcie zmiany ciśnienia wewnętrznego. Można zauważyć, iż do ciśnienia wynoszącego ok. 40 barów, charakterystyka ma charakter liniowy, po czym zmienia kąt nachylenia i dalej jest w przybliżeniu liniowa. Pierwszy z obszarów charakteryzował się brakiem sygnałów pochodzących z emisji akustycznej; wzrost ciśnienia nie powodował powstawania defektów w strukturze materiału kompozytowego (Rys. 6.21). Po przekroczeniu wspomnianej wartości ciśnienia, czujniki EA rejestrowały niemal liniowy

wzrost zdarzeń akustycznych aż do ciśnienia wynoszącego ok. 110 bar. Następnie po jego przekroczeniu następował lawinowy wzrost emisji, który jednak nie został zarejestrowany przez interferometryczne czujniki światłowodowe.

6.4 Wybrane problemy eksperymentalne – podsumowanie i sugestie w zakresie dalszych badań

Zaproponowana metoda wytwarzania prototypowych, wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych pozwoliła na wykonanie dobrych jakościowo obiektów badań. Otrzymane zbiorniki charakteryzowały się gładką powierzchnią zewnętrzną, brakiem widocznych nieciągłości oraz zwartą strukturą zbrojenia wyplatane (Rys. 6.23). Zastosowanie ramy wyplatanej pozwoliło na zintegrowanie, w czasie trwania procesu wyplatania, światłowodowych siatek Bragga, a także interferometrycznych czujników światłowodowych typu SOFO®, które umożliwiały ciągłą analizę stanu naprężeń występujących w zbiornikach ciśnieniowych, zarówno na etapie produkcji (wyplatanie, infiltracja, utwardzanie), jak również w trakcie badań laboratoryjnych.



Rys. 6.23. Kompozytowe zbiorniki ciśnieniowe wykonane w technologii wyplotu włókna ciągłego.

Zastosowanie czujników FBG do pomiarów odkształceń na etapie produkcji zbiorników potwierdziło możliwość ich zastosowania do kontrolowania naciągu rowingu w trakcie wyplatania oraz na wskazanie obszarów o nienapreżonym wstępie wzmocnieniu.

Obydwa rodzaje zastosowanych czujników światłowodowych udało się wprowadzić bezpośrednio do struktury kompozytu, co pozwoliło w sposób „naturalny” zabezpieczyć je przed uszkodzeniami mechanicznymi. Ponadto badania nie wykazały ich negatywnego wpływu na właściwości mechaniczne badanych butli.

Krokiem w kierunku automatyzacji procesu produkcyjnego zbiorników kompozytowych ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi, powinno być sprawdzenie możliwości

aplikacji światłowodu z czujnikami FBG w trakcie procesu wyplotu. Pozwoli to m.in. na dokładniejsze kontrolowanie kierunku instalacji czujników (zgodnie z wyplatany rowingiem) oraz przyśpieszenie produkcji. W tym celu należałoby uzbroić ramę wyplatarki w dodatkową szpulę ze światłowodem. Wówczas czujnik byłby dostarczany do miejsca docelowego, podobnie jak taśma rowingu szklanego.

Kolejnym krokiem, który jednak wykracza poza zakres niniejszej pracy, powinno być przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej (oraz jej weryfikacja numeryczna), a także porównanie własności mechanicznych zbiorników ciśnieniowych zbrojonych wyplatany włóknem szklanym ze zbiornikami wykonymi tradycyjną techniką nawoju włókna.

7 Aspekty modelowania kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych

7.1 Wprowadzenie

Zagadnienie modelowania nie było przedmiotem badań w niniejszej rozprawie. Ze względu na aktualność tematyki modelowania i pokładane w niej nadzieje uznano jednak za celowe poruszenie wybranych zagadnień z tego obszaru. Modelowanie jest bowiem niezbędnym wymogiem obniżenia kosztów prac eksperymentalnych, a w konsekwencji i kosztów konstrukcji. Poza tym dobre modele obliczeniowe zbiorników ułatwiłyby pomiary wskazując np. optymalną lokalizację czujników i oczekiwane wartości graniczne mierzonych wielkości. Zagadnienie jest jednak złożone, co starano się udokumentować poniżej; jest także przedmiotem badań zespołu, z którego wywodzi się autor.

Zbiorniki kompozytowe są ekstremalnie wytrzymałymi konstrukcjami ze względu na potrzebę gromadzenia paliw gazowych pod wysokim ciśnieniem przy możliwie małej masie samego zbiornika. Restrykcyjne wymagania w zakresie bezpieczeństwa użytkowania, potrzeba wieloletniej eksploatacji oraz drogie materiały (głównie specjalne odmiany tzw. wysokomodułowych włókien węglowych), z których są wykonane, powoduje łącznie, iż wytwarzanie tej klasy zbiorników jest kosztowne. Koszt jest jednocześnie barierą upowszechnienia paliw gazowych, w tym głównie wodoru w transporcie.

Próby modelowania zbiorników podejmowano od dawna lecz z ograniczonym skutkiem. Wynika to przede wszystkim z faktu, iż metody modelowania stosowane skutecznie w przypadku metali nie są efektywne w odniesieniu do kompozytów polimerowych ze wzmocnieniem włóknistym. W tym przypadku bowiem decydujący wpływ na właściwości kompozytu ma struktura, sposób ułożenia włókien oraz ich współpraca z osnową. Klasyczne modele nie zapewniają natomiast zadowalającego stopnia bezpieczeństwa konstrukcji ze wzmocnieniem włóknistym, wobec których stosowano projektowanie wspomagane komputerowo. Podstawowym celem i problemem do rozwiązania jest zatem poszukiwanie związków pomiędzy strukturą mikroskopową, a właściwościami mechanicznymi odpowiadającymi makroskali, istotnymi w zastosowaniach inżynierskich. Modele te z kolei wymagają identyfikacji parametrów materiałowych w oparciu o badania eksperymentalne. Powoduje to łącznie, iż procedury certyfikacji wyrobów, normy i inne regulacje nie dopuszczają, w przypadku wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych, stosowania metod modelowania numerycznego. Jedynym uznanym obecnie sposobem certyfikacji wyrobu są liczne i drogie badania eksperymentalne, co także zwiększa koszt wyrobu.

Należy podkreślić, iż różne aspekty modelowania zbiorników kompozytowych są aktualnie przedmiotem badań renomowanych producentów i ważnym celem w licznych projektach międzynarodowych (np. HyComp, InGas, HyCube: w ramach 7th Framework

Programme) oraz polsko-niemieckich (np. 3D textile reinforced aluminium-matrix composites for complex loading situations in automobile and machine parts), w których bierze udział Zakład Mechaniki Ośrodków Ciągłych (ZMOC), w tym i autor rozprawy. Poniżej omówiono zwięźle głównie te zagadnienia, które są podejmowane przy udziale Zakładu w ramach naukowych konsorcjów.

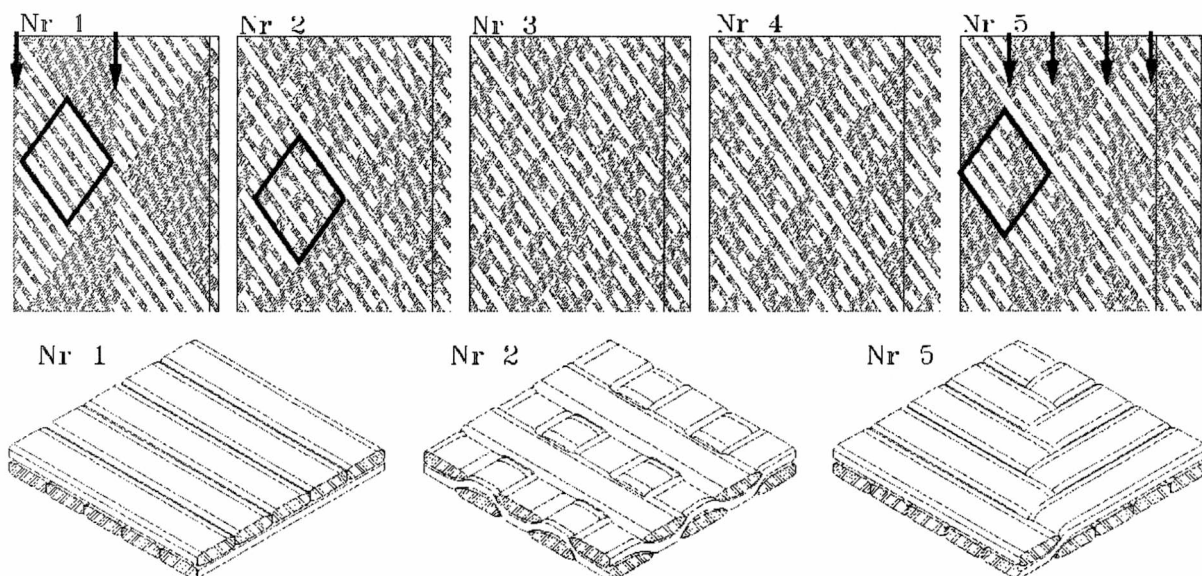
Wcześniej, w rozdziale 4, przytoczono również przypadki modelowania, które wykorzystano bezpośrednio w pracy.

7.2 Projektowanie i modelowanie geometrii zbiornika oraz struktur nawijanych

Zasady modelowania zbiornika muszą uwzględniać między innymi fakt, iż jego geometria i wymiary (głównie średnica i długość) muszą być dopasowane indywidualnie do każdego modelu samochodu i przewidzianej na ten cel przestrzeni. Geometria zbiornika, względy wytrzymałościowe i konieczność redukcji kosztów wytwarzania są łącznie powodem optymalizacji struktury ułożenia wiązek włókna wzmacniającego (liczby i rozmieszczenia przeplotów, szerokości i liczby wiązek, itp.) w warstwie nośnej kompozytowych butli w procesie nawijania. Wykazano wcześniej, np. [145, 146], iż ma to kluczowy wpływ na zmęczeniowe oraz statyczne właściwości wytrzymałościowe. Chodzi w tym przypadku o dobór optymalnej geometrii nawoju, który może doprowadzić do istotnego zmniejszenia masy oplotu CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic). Zagadnienie to w geometrii nazwane jest problemem parkietowania. Ważne jest również, by zamodelowana procedura nawijania była możliwa do zaaplikowania na dostępnych na rynku sterowanych numerycznie nawijarkach. Dostępne komercyjnie oprogramowanie do nawijarek nie spełnia wszystkich oczekiwań lub jest kłopotliwe w użytkowaniu. Dlatego zagadnienie to podjął i rozwiązał w postaci tzw. metody tablicowej dr inż. Wojciech Błażejewski, np. [147, 148, 149].

W metodzie tablicowej dowolny nawój opisują jedynie dwie liczby, z których jedna to wielkość tablicy, a druga - numer wiersza. Poniżej przedstawiono (Rys. 7.1) widoki aksometryczne wycinków wybranych nawojów zaznaczonych ramką.

W pracach [145, 146, 149] przeanalizowano, które nawoje mają korzystny – lub odwrotnie – wpływ na masę i wytrzymałość struktury nośnej. Wykazano ponadto, iż metodę tablicową można skutecznie zaaplikować na nawijarkach różnych producentów. Na Rys. 7.1 zaznaczono też strzałkami miejsca załamania włókien (tzw. linie przeplotu), co powoduje lokalne odchylenie ich osi od pierwotnego kierunku i stanowi rodzaj karbu.

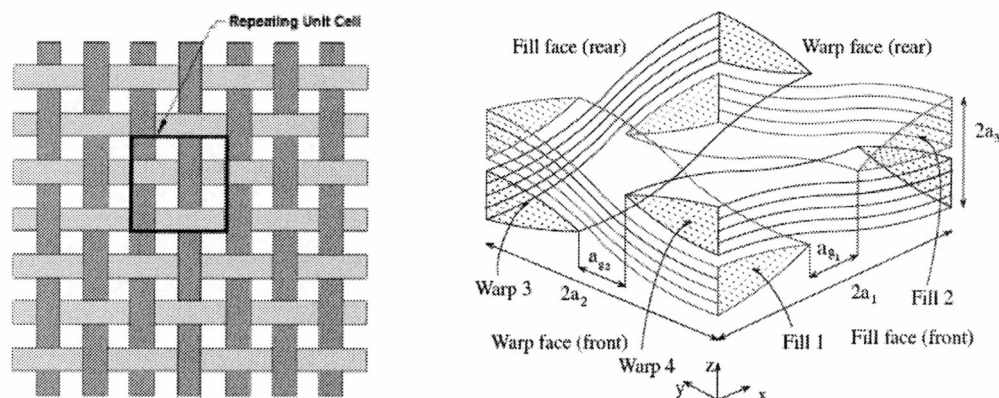


Rys. 7.1. Widoki aksonometryczne charakterystycznych obszarów nawojów Nr 1, 2 i 5, zaznaczonych ramkami [146] (numeracja nawojów jak w pracy cytowanej).

7.3 Modelowanie właściwości mechanicznych kompozytu w różnych skalach długości metodą homogenizacji. Obciążenia quasistatyczne.

Kompozyty polimerowe ze wzmocnieniem włóknistym mają skomplikowaną strukturę na poziomach mikro- i mezoskopowych, co nie pozwala na pełny opis w tych skalach długości. Modele konstytutywne takich materiałów tworzy się z zachowaniem zasad mechaniki ośrodków ciągłych. W tym przypadku materiał jest sprężystym ciałem anizotropowym. Ideą byłaby możliwość otrzymania parametrów sprężystych na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Jest to jednak dość kosztowne i skomplikowane. Drobną zmianą w geometrii wzmocnienia wymagałaby nowych badań eksperymentalnych. Dlatego alternatywą dla przeprowadzania dużej ilości badań eksperymentalnych są metody homogenizacji (metody uśredniania), intensywnie rozwijane już od dłuższego czasu, np. [150, 151, 152]. Metody homogenizacji pozwalają na wyznaczenie parametrów kompozytu przy znajomości właściwości materiałowych poszczególnych jego składników, czyli osnowy i wzmocnienia. Innymi słowy głównym celem modelowania materiałów kompozytowych jest znalezienie równań konstytutywnych w skali makro na podstawie znajomości właściwości materiałowych poszczególnych faz tworzących kompozyt oraz architektury ułożenia włókien (przejście ze skali mikro- do mezo-, a następnie makroskopowej). Wyznaczanie parametrów sprężystych (np. modułu Younga, czy współczynnika rozszerzalności cieplnej) przeprowadza się poprzez odpowiednie uśrednianie w wybranej reprezentatywnej objętości wartości poszczególnych parametrów materiałowych. W skali makroskopowej struktura kompozytu nie jest „widziana”, ale znana jest zależność między naprężeniem i odkształceniem, uwzględniająca jednak właściwości faz oraz geometrię ułożenia włókien.

Jest wiele metod rozwiązywania tego zagadnienia. Tradycyjne podejście, z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych, sprowadza się do przybliżonego rozwiązywania układów równań różniczkowych cząstkowych wynikających z warunków równowagi i nierozdzielności, związków konstytutywnych osnowy i włókien oraz związków wynikających z warunków na granicy poszczególnych faz. Dlatego też, aby rozwiązania istniały i były jednoznaczne, warunki brzegowe muszą być odpowiednio regularne. Najczęściej zakłada się strukturę cykliczną Rys. 7.2. W ostatnich czasach rozwinięto konkurencyjne metody opisu. Taką metodą jest Metoda Komórek (ang.: Method of Cells), która w dalszym etapie rozwinięta została do Uogólnionej Metody Komórek (ang.: Generalized Method of Cells). Pozwala ona na modelowanie złożonych struktur kompozytowych poprzez wyodrębnienie powtarzającej się komórki reprezentatywnej.



Rys. 7.2. Struktura i ćwiartka jednostkowej komórki reprezentatywnej [153].

Na podstawie wyodrębnionej Komórki Reprezentatywnej (RVE) oraz odpowiednio dobranej metody homogenizacji przewidujemy makroskopowe zachowanie materiału kompozytowego. W zależności od ułożenia włókien, RVE może być podzielona na podkomórki (Rys. 7.2), a homogenizacja może odbywać się na kilku etapach. Sposób oraz gęstość podziału zależne są od złożoności struktury materiału. Metoda komórek pozwala również na zastosowanie nieliniowych równań konstytutywnych do opisu poszczególnych faz tworzących kompozyt oraz różnego rodzaju modeli zniszczenia. Może być ona łączona z innymi modelami mikromechanicznymi.

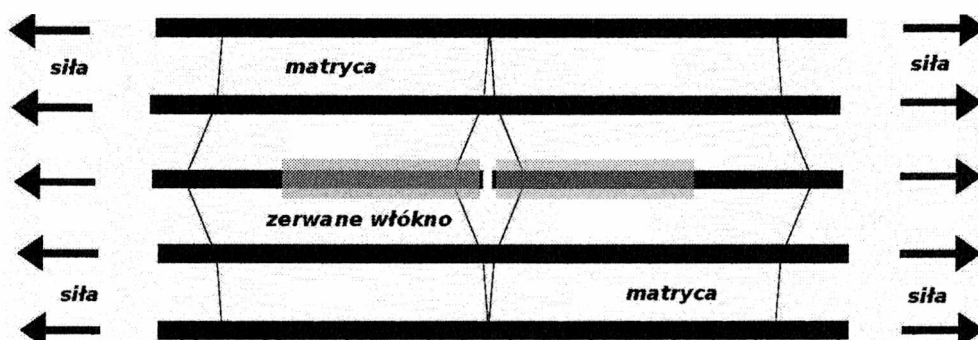
W pracach zespołu Dr inż. Grażyny Ziętek, np. [153, 154], szerzej opisano badania własne ZMOC, zastosowano różne metody homogenizacji i porównano wyniki z rezultatami badań eksperymentalnych dla kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem ciągłym.

7.4 Modelowanie kumulacji uszkodzenia kompozytu z użyciem automatów komórkowych i geometrii fraktalnej

Opisane powyżej metody homogenizacji pozwalają na obliczenia wytrzymałościowe i projektowanie elementów wykonanych z kompozytu. Jednak z praktycznego (inżynierskiego) punktu widzenia równie ważne jest przewidywanie żywotności elementów i rozwoju pęknięć uszkodzeń materiału. Założono, że wytrzymałość kompozytu zależy przede wszystkim od zbrojenia, czyli włókien. Dlatego modelując i symulując proces wzrostu uszkodzeń materiału skoncentrowano się na procesie zrywania włókien. Badania z tego zakresu prowadzi zespół Prof. Marka Rybaczuka.

Ośrodek ciągły opisywany jest w tym przypadku w języku automatów komórkowych. Badany kompozyt, wzmocniony włóknami, jest traktowany wówczas jako złożony z kilku różnych typów automatów. Każdy fragment materiału modelowany jest abstrakcyjnym matematycznym elementem, z odpowiednimi stopniami swobody, reprezentowanymi z kolei przez wielkości fizyczne związane z indywidualnym automatem. Zamiast równań różniczkowych cząstkowych (mechanika ośrodków ciągłych), rozwiązuje się równania mechaniki stochastycznej, opisujące dynamikę poszczególnych automatów. Postać równań dynamiki zależy od przyjętego i zastosowanego automatu. Kluczowe znaczenie ma przy tym oddziaływanie pomiędzy sąsiadującymi automatami lub tzw. długozasięgowe siły oddziaływania.

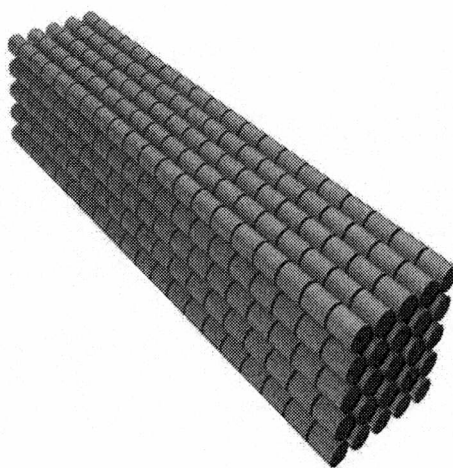
Zbadany stochastyczny model zbrojonego włóknami kompozytu sugeruje, że oddziaływanie poprzez matrycę, pomiędzy niezbyt odległymi włóknami, może być równie ważne. Naturalnym sposobem badania jest wykonanie symulacji numerycznych dla wzrastającej liczby automatów tworzących kompozyt. Następnie, wykonując uśrednianie, z uwagi na zmienne mikroskopowe odpowiadające indywidualnym automatom, należy przejść do wielkości opisujących ośrodek ciągły w zakresie skal długich. Opracowano specjalne metody analitycznej analizy równań opisujących powyższe procesy [155].



Rys. 7.3. Wpływ pęknięcia pojedynczego włókna na włókna sąsiadujące [156].

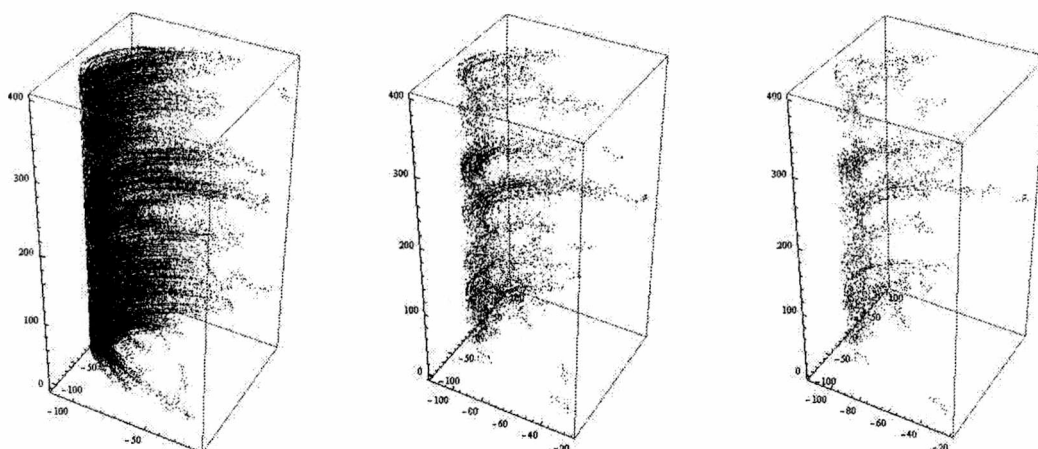
Zakłada się, że same włókna są na tyle cienkie, że praktycznie nie obserwuje się propagacji pęknięć w pojedynczych włóknach. Również pękanie matrycy powinno mieć zde-

cydowanie mniejszy wpływ. Dlatego modelując i symulując proces wzrostu uszkodzeń materiału rozważa się proces zrywania włókien (Rys. 7.3). Zasadniczym celem przeprowadzonych badań jest konstrukcja programów symulujących ten proces. Zakładając odpowiednie parametry mechaniczne poszczególnych automatów można następnie obliczyć krzywe naprężenie-odkształcenie oraz odpowiadające im równanie konstytutywne. Aktualna wersja programu zakłada zbrojenie w formie prostych prostoliniowych włókien lub zbrojenia tkaniną. Równoległy układ włókien ma miejsce nie tylko w prostopadłościennych próbkach, ale również w próbkach NOL, szczególnie przydatnych w badaniach zbiorników. Zbudowany program wynika z modelu przedstawionego poniżej na Rys. 7.4.

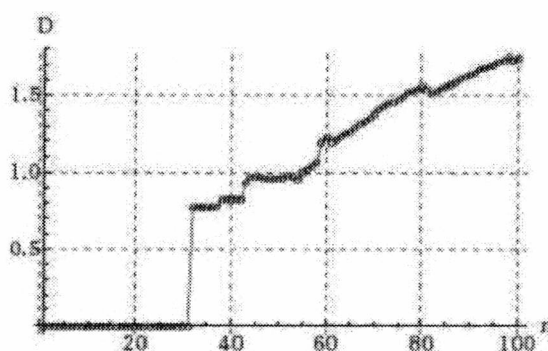


Rys. 7.4. Automaty komórkowe modelujące włókna w kompozycie [156, 157].

Przyjęty model procesu zrywania włókien w kompozycie zakładał, iż każde włókno zostało przedstawione jako zbiór automatów komórkowych. Aby otrzymać wysoką dokładność użyto dużej liczby automatów, rzędu 3 milionów. Z uwagi na możliwości pomiarowe dużą część symulacji wykonano dla próbek typu NOL. Otrzymano w rezultacie rozkład automatów komórkowych w próbkach NOL dla obwodowego zbrojenia. Przykładowy przebieg rozwoju defektów w próbce NOL przedstawiono na Rys. 7.5. Określenie kumulacji procesu uszkodzeń określono z kolei z wykorzystaniem geometrii fraktalnej (Rys. 7.6).

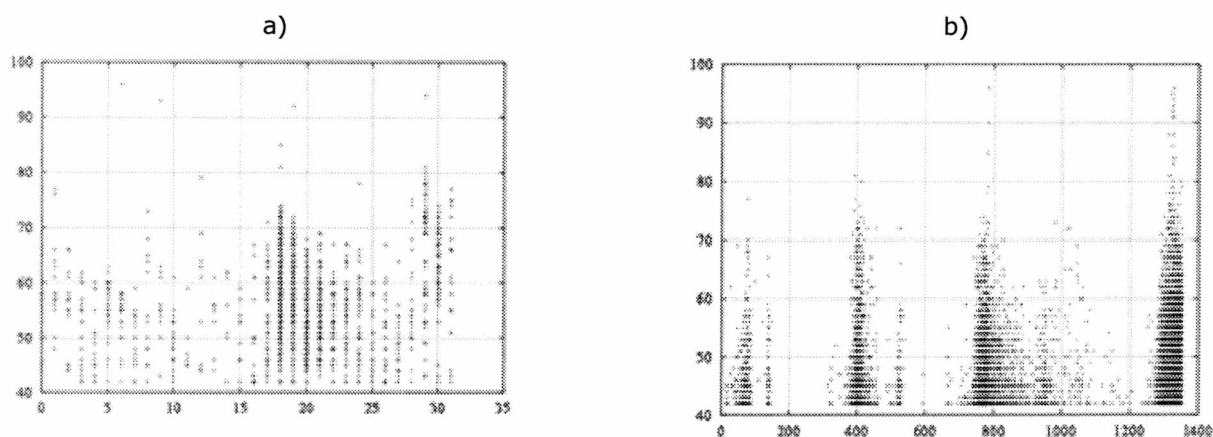


Rys. 7.5. Symulowany wzrost defektów w próbce typu NOL, w zależności od czasu dla wybranych etapów wzrostu defektów [156].



Rys. 7.6. Przykładowa zmiana wymiaru fraktalnego związana ze wzrostem defektów w funkcji czasu wyrażonego w procentach [156].

W rzeczywistym kompozycie nie ma możliwości ciągłego obserwowania rosnących defektów. Dlatego równoległe do symulacji procesu zrywania skonstruowano oprogramowanie symulujące emisję akustyczną wzdłuż osi próbki NOL. Przykładowe rezultaty przedstawiono na Rys. 7.7.



Rys. 7.7. Przykładowe przebiegi sygnałów akustycznych dla próbki typu NOL: wynik modelowania (a) oraz wyniki pomiaru (b) [157, 158].

Szerzej zagadnienia związane z modelowaniem kumulacji uszkodzeń opisano w pracach [159, 160, 157, 158, 161, 162]. Należy jednak podkreślić, iż dotychczasowe rezultaty modelowania odniesiono jedynie do próbek kompozytowych (prostopadłościennych i typu NOL, częściowo również rurowych), natomiast aplikacja tego podejścia do zbiorników wysokociśnieniowych wymaga dalszych badań.

7.5 Uwagi końcowe

Wyniki prac w zakresie modelowania kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych do gromadzenia paliw gazowych (metan, wodór) wykazują aktualnie zróżnicowaną przydatność w praktyce inżynierskiej. Poniżej wskazano na kilka kluczowych kwestii.

1. Modelowanie geometrii nawoju metodą tablicową (oraz kształtu i wymiarów zbiornika) jest efektywnym narzędziem w projektowaniu zbiorników. Dodatkowo metoda jest możliwa do zaaplikowania na komercyjne nawijarki.
2. Modelowanie związków konstytutywnych dla kompozytów stosowanych na zbiorniki są przedmiotem intensywnych prac w wielu ośrodkach badawczych. Wykorzystanie tych modeli w projektowaniu zbiorników, przez stosowanie komercyjnych pakietów do modelowania numerycznego, jest obarczone dużym ryzykiem, co powoduje, iż procedury modelowania numerycznego zbiorników nie są dotychczas akceptowane przez normy i inne regulacje.
3. Modelowanie kumulacji uszkodzeń w zbiornikach wymaga dalszych prac. Szczególnie obiecujące są procedury z zastosowaniem automatów komórkowych i geometrii fraktalnej.

Badania własne (ZMOC) w zakresie modelowania właściwości kompozytów - i szerzej zbiorników kompozytowych - są częścią działań w ramach europejskich i krajowych konsorcjów badawczych, w tym z udziałem renomowanych producentów zbiorników kompozytowych do wodoru i metanu.

8 Wnioski i uwagi końcowe

Przedmiotem zainteresowania była analiza stanu odkształcenia i kumulacji uszkodzeń wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych przeznaczonych do gromadzenia paliw gazowych (metan, wodór) z wykorzystaniem światłowodowych układów pomiarowych oraz stworzonego na ich podstawie zintegrowanego systemu monitorującego (ang.: Structural Health Monitoring System - SHMS). Podjęto próbę identyfikacji procesu degradacji materiału kompozytowego poprzez pomiar lokalnych odkształceń.

*Przedłożone rezultaty pozwalają stwierdzić, iż analiza stanu odkształcenia wysokowyężonej kompozytowej powłoki nośnej zbiornika umożliwia ocenę stopnia degradacji w trakcie użytkowania, a tym samym umożliwia określenie czasu bezpiecznej eksploatacji. **Udowodniono w ten sposób tezę pracy, osiągnięto cel główny i zrealizowano zadania szczegółowe.***

Rezultaty szczegółowe omówiono dodatkowo poniżej. Wnioski podzielono umownie na odnoszące się do głównych celów i tezy pracy oraz zagadnień dodatkowych, ważnych dla dalszego rozwoju wiedzy z zakresu monitorowania ekstremalnie wyężonych konstrukcji kompozytowych oraz innych.

- I. Stworzono eksperymentalny system pomiarowy przeznaczony do oceny stanu odkształcenia kompozytowego zbiornika kompozytowego.
 - a) Opracowano oryginalny system typu SHM, bazujący na różnych czujnikach światłowodowych (światłowodowe siatki Bragga FBG, czujniki interferometryczne SOFO, mikrougięciowe), umożliwiające realizację pomiarów pola odkształceń wysokowyężonych obiektów kompozytowych.
 - b) Opracowano - w oparciu o istniejące normy i regulacje prawne - procedury badawcze dla wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych, a także próbek rurowych oraz typu NOL, umożliwiające analizę stanu odkształcenia obiektów testowych, dla różnych rodzajów obciążeń.
 - c) Przeprowadzono serię badań - w ramach fazy wstępnej- z wykorzystaniem kompozytowych próbek rurowych o różnych geometriach nawoju oraz wylotu, dla których za pomocą czujników światłowodowych analizowano pole odkształceń pod wpływem różnego rodzaju obciążeń zewnętrznych (w tym również do zniszczenia).

- d) Przeprowadzono serię badań na komercyjnych wysokociśnieniowych zbiornikach kompozytowych, przeznaczonych do gromadzenia paliwa w postaci sprężonego metanu (CNG) lub wodoru (CH_2), o ciśnieniach pracy od 200 do 700 barów, dla których podjęto identyfikację stanu odkształcenia kompozytowej powłoki nośnej.
- e) Zrealizowano badania cykliczne (w zakresie ciśnień od 20 do 875 barów) oraz statyczne (do zniszczenia, ciśnienia wewnętrzne rzędu 1650 barów) komercyjnych zbiorników kompozytowych, z zachowaniem wszelkich standardów opisanych w normach.
- f) Określono rodzaj, liczbę oraz lokalizację czujników światłowodowych na zbiorniku, do zapewnienia wystarczająco szybkiego i dokładnego wykrywania defektów zagrażających rozszczelnieniem zbiornika.
- g) Przeprowadzono badania na obiektach z tzw. programowanymi defektami (o znanej geometrii), co umożliwiło przetestowanie zaproponowanej metody wykrywania uszkodzeń w zbiornikach wysokociśnieniowych.
- h) Porównano możliwości systemów pomiarowych o różnych długościach głowic pomiarowych (tzw. short i long gage sensors) oraz typach modulacji (interferometryczne czujnik SOFO z modulacją fazy sygnału optycznego oraz czujniki z modulacją długości fali - światłowodowe siatki Bragga) do zastosowań w monitorowaniu stanu odkształceń zbiorników kompozytowych oraz wykrywania tzw. programowanych defektów.
- i) Wykazano, iż zastosowanie światłowodowej techniki pomiarowej umożliwia wyznaczenie (dla próbek rurowych o kącie nawoju 30° i 45°) momentu, w którym następuje efekt ścięcia na granicy faz (w analizowanym przypadku: włókno szklane – żywica epoksydowa). Ponadto przeprowadzone badania potwierdziły, iż dla większych wartości kąta ułożenia wzmocnienia w materiale kompozytowym, możliwe jest przeniesienie większych wartości obciążeń wywołanych działaniem ciśnienia wewnętrznego.

W rezultacie wykazano pełną przydatność układu pomiarowego do analizy stanu odkształcenia powłoki nośnej wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych dla różnych rodzajów obciążeń (cykliczne, statyczne).

- II. Podjęto próbę oceny kumulacji uszkodzeń kompozytowej warstwy nośnej zbiornika wysokociśnieniowego.
 - a) Zrealizowano serię badań statycznych na próbkach typu NOL, z wykorzystaniem metody emisji akustycznej (EA) oraz światłowodowych czujników odkształceń (typu FBG), potwierdzających możliwość swoistego rodzaju kalibracji systemu monitorującego stan pola odkształceń materiału kompozytowego, tak aby możliwa była ocena stanu jego degradacji (stopnia skumulowania uszkodzenia),

a tym samym określenie poziomu bezpieczeństwa użytkowania wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych.

- b) Podjęto badania na pełzanie próbek NOL, dla których przeprowadzono równoległe pomiary metodami EA oraz odkształceń (FBG), umożliwiające ocenę degradacji materiału kompozytowego typu CFRC.
- c) Przeprowadzone pomiary oraz uzyskane wyniki potwierdziły, iż w badanych próbkach przy stałym obciążeniu osiowym oraz dla różnych jego intensywności postępowała lokalna degradacja materiału kompozytowego i w rzeczywistości występowało jego pełzanie.

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz wykazano, iż występuje korelacja pomiędzy zmianami pola odkształceń materiału kompozytowego, rejestrowanymi przez czujniki światłowodowe FBG, a zmianami sygnałów emisji akustycznej. Należy jednak podkreślić, iż w opisywanej aplikacji zastosowane czujniki FBG nie rejestrowały w sposób bezpośredni zdarzeń akustycznych, a jedynie zjawisko (wzrost defektów w strukturze), powodujące równoczesną zmianę stanu odkształcenia materiału kompozytowego oraz związaną z tym emisję akustyczną. Zagadnienie, o dużych potencjalnych możliwościach aplikacji, wymaga dalszych badań.

- III. Wykonano serię nowatorskich, wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych - metodą wplotu włókna długiego - ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi.
 - a) Zaimplementowano - w trakcie procesu wyplatania kompozytowej powłoki nośnej - w strukturze zbiornika (wewnątrz materiału kompozytowego), światłowodowe czujniki typu FBG oraz SOFO®, które umożliwiały ciągłą analizę stanu odkształceń, zarówno na etapie produkcji (wyplatanie, infiltracja, utwardzanie), jak również w trakcie badań laboratoryjnych. Pozwoliło to także w sposób „naturalny” zabezpieczyć czujniki przed uszkodzeniami mechanicznymi. Ponadto zrealizowane badania ciśnieniowe nie wykazały negatywnego wpływu czujników na właściwości mechaniczne obiektów.
 - b) Wykazano możliwość wykorzystania zintegrowanego systemu SHM pomiaru odkształceń do kontrolowania naciągu rowingu w trakcie wyplatania zbiorników oraz do wskazania obszarów o nienaprężonym wstępnie wzmocnieniu (potencjalnych prekursorów rozwoju defektów w trakcie eksploatacji). System wykazał też przydatność do kontroli powtarzalności procesu produkcyjnego zbiorników.
- IV. W celu poznawczym dokonano przeglądu i analizy najnowszych kierunków badań w modelowaniu numerycznym konstrukcji kompozytowych, uwzględniający m.in. metody homogenizacji, teorię fraktali oraz automaty komórkowe.
- V. Zaprezentowano dodatkowo (w końcowej części rozprawy) przykłady innych laboratoryjnych aplikacji systemów SHM, bazujących na czujnikach światłowodowych,

m.in. do monitorowania istniejącego zawieszenia samochodu sportowego typu Formula Student oraz jego modyfikacji z wykorzystaniem elementów kompozytowych. Inne zastosowania dotyczyły kompozytowych izolatorów wysokonapięciowych, materiałów o gigantycznej magnetostrykcji (kompozyty magnetoreologiczne typu SMART) oraz kompozytowych pultrud stosowanych jako wzmocnienia w stalowych i betonowych konstrukcjach budowlanych.

- VI. Przedstawiono ponadto przykłady przemysłowych aplikacji światłowodowych systemów pomiarowych SHM w obszarze energetyki konwencjonalnej. Zastosowano mianowicie:
- a) system do monitoringu zawieszów oraz ścian komory paleniskowej fluidalnego kotła energetycznego w Elektrowni Siersza (zgłoszony wniosek patentowy do Urzędu Patentowego RP).
 - b) system do monitoringu kompozytowych rurociągów o średnicach rzędu 1,2 metra, wykorzystywanych w Instalacji Odsiarczania Spalin (IOS) bloku energetycznego o mocy 858 MW w Elektrowni Bełchatów.
- VII. Dorobek publikacyjny, zgromadzony w trakcie przygotowania rozprawy opublikowano w pięćdziesięciu czterech pracach (czasopismach lub recenzowanych materiałach konferencyjnych krajowych i zagranicznych), których autorem lub współautorem jest doktorant.
- VIII. Niniejsza praca była realizowana w ramach prowadzonych w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej projektów:
- a) StorHy – Storage of Hydrogen; 6-ty Program Ramowy Unii Europejskiej.
 - b) InGAS – Integrated GAS Powertrain. Low emissions, CO2 optimised and efficient CNG engines for passenger cars (PC) and light duty vehicles (LDV); 7-my Program Ramowy Unii Europejskiej.
 - c) HyCOMP - Enhanced Design Requirements and Testing Procedures for Composite Cylinders intended for the Safe Storage of Hydrogen; program typu: Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU); 7-my Program Ramowy Unii Europejskiej.
 - d) Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii; projekt finansowany ze środków UE w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (POIG.01.01.02-00-016/08).
 - e) Wykorzystanie nanotechnologii w nowoczesnych materiałach; projekt finansowany ze środków UE w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (POIG 01.01.02-02-002/08).

- f) GRANT – Wsparcie prac badawczych poprzez stypendia naukowe dla doktorantów; projekt finansowany ze środków UE w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki.
- g) współpraca międzyuczelniana z Technische Universität Dresden (w ramach projektów TUDAG).

9 Bibliografia

- [1] W. Błażejowski, A. Gasperowicz, P. Gąsior i J. Kaleta, „Kompozytowe zbiorniki dla CNG i wodoru, wymogi homologacyjne i metody badań. Cz. 1,” *Czas na Gaz!*, nr 19, pp. 14-15, 2006.
- [2] „Draft ECE Compressed Gaseous Hydrogen Regulation, Revision 12b”.
- [3] W. Błażejowski, P. Gąsior i J. Kaleta, „Burst test of high pressure composite vessels for gasous fuels storage,” w *5th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Ceske Budejovice, Cesky Krumlov, Czech Republic, September 24-27, 2008*.
- [4] „Regulation No. 110, Rev.2/Add.109/Rev.1.”.
- [5] R. Jachowicz, „Czujniki pomiarowe - kierunki badań i postępu technicznego,” w *IV Krajowa Szkoła Optoelektroniki: Czujniki elektroniczne i światłowodowe oraz ich zastosowania*, Waplewo, 1990.
- [6] B. Zhang i K. Mojtaba, „High Temperature Resistance Temperature Sensor Based on the Hydrogen Loaded Fiber Bragg Grating,” *IEEE Sensors Journal*, tom 7, nr 4, pp. 586-591, 2007.
- [7] G. Brambilla, „High-temperature fibre Bragg grating thermometer,” *Electron. Lett.*, tom 38, pp. 954-955, 2002.
- [8] D. Kang, C. Kim i C. Kim, „The embedment of fiber Bragg grating sensors into filament wound pressure tanks considering multiplexing,” *NDT&E International*, tom 39, p. 109–116, 2006.
- [9] D. Balageas, C. Fritzen i A. Guemes, *Structural Health Monitoring*, London/Newport Beach: ISTE, 2006.
- [10] B. Glisic i D. Inaudi, *Fibre Optic Methods for StructuralHealth Monitoring*, John Wiley and Sons Ltd, 2007.
- [11] S. Sumitro, T. Okamoto i D. Inaudi, „Intelligent Sensory Technology for Health Monitoring Based Maintenance of Infrastructures,” w *11th SPIE's Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, USA, 2004.
- [12] Z. Kaczmarek, *Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe*, Warszawa: Agenda Wydawnicza PAK, 2006.
- [13] B. Glisic i D. Inaudi, *Fibre Optic Methods for StructuralHealth Monitoring*, John Wiley and Sons Ltd, 2007.
- [14] F. Yu i S. Yin, *Fiber Optic Sensors*, New York: Marcel Dekker Inc., 2002.

- [15] M. Xu, J. Archambault, L. Reekie i P. Dakin, „Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensor,” *Electronics letters*, tom 30, nr 13, pp. 1085-1087, 1994.
- [16] Y. J. Rao, *Fiber Bragg grating sensors: Principles and applications in Optical Fiber Sensor Technology*, tom 2, London: Chapman & Hall, 1998.
- [17] www.micronoptics.com. [Online].
- [18] I. Perez, H. Cui i E. Udd, „Acoustic Emission Detection using Fiber Bragg Gratings,” *Proceedings of SPIE*, tom 4328, 2001.
- [19] W. Lienhart, „Experimental Investigation of the Performance of the SOFO Measurement System,” w *Structural Health Monitoring 2005, Proc. 5th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, 2005.
- [20] D. Inaudi, A. Elamari, L. Pflug, N. Gisin, J. Breguet i S. Vurpillot, „Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil engineering structures,” tom 44, pp. 125-130, 1994.
- [21] W. Błażejowski, P. Gąsior i J. Kaleta, „Interferometryczne czujniki światłowodowe w monitorowaniu wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych,” w *XXIII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego Jachranka*, Warszawa, 2008.
- [22] E. Pinet, „Fabry-Perot Fiber-Optic Sensors for Physical Parameters Measurement in Challenging Conditions,” *Journal of Sensors*, tom 2009, nr 720980, 2009.
- [23] T. Abe, Y. Mitsunaga i H. Koga, „A strain sensor using twisted optical fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, tom 7, nr 3, 1989.
- [24] J. Braunstein, J. Ruchala i B. Hodac, „Smart structures: fiber-optic deformation and displacement monitoring,” w *First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - IABMAS 2002*, Barcelona, 2002.
- [25] www.osmos-group.com. [Online].
- [26] J. Berthold, „Sensors in industrial systems,” w *Optical Fiber Sensors Volume IV: Applications, Analysis, and Future Trends*, J. Dakin i B. Culshaw, Redaktorzy, Artech House, 1997, pp. 261-308.
- [27] J. Zheng i S. Albin, „Self-referenced reflective intensity modulated fiber optic displacement sensor,” *Opt. Eng.*, tom 38, nr 2, pp. 227-232, 1999.
- [28] E. Udd, *Fiber optic sensors. An introduction for engineers and scientists*, New York: John Wiley and Sons Ltd., 1991.
- [29] V. Kondratov i V. Redko, „Classification of Fiber-Optic Pressure Sensors with Amplitude Modulation of Optical Signal,” *Sensors & Transducers Journal*, tom 100,

nr 1, pp. 146-160, January 2009 2009.

- [30] S. Binu, V. Mahadevan Pillai i N. Chandrasekaran, „Fibre optic displacement sensor for the measurement of amplitude and frequency of vibration,” *Optics & Laser Technology*, tom 39, nr 8, pp. 1537-1543, November 2007.
- [31] www.mtiinstruments.com/products/fiberopticmeasurement.aspx. [Online].
- [32] P. Gąsior i M. Sipura, „Czujniki światłowodowe do monitorowania odkształceń konstrukcji z materiałów kompozytowych,” w *Człowiek - cywilizacja - przyszłość. IV Konferencja Naukowa Studentów. Referaty, Wrocław, 22-24 maja 2006*, Wrocław, 2006.
- [33] K. Grattan i B. Meggit, *Optical fiber sensor technology*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [34] J. Siuzdak, *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, Warszawa: WKŁ, 1999.
- [35] G. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, San Diego: Academic Press, 1995.
- [36] V. Lanticq, R. Gabet, F. Taillade i S. Delepine-Lesoille, „Distributed Optical Fibre Sensors for Structural Health Monitoring: Upcoming Challenges,” w *Optical Fiber New Developments*, C. Lethien, Red., InTech, 2009, pp. 177-200.
- [37] J. Smith, A. Brown, M. DeMerchant i X. Bao, „Simultaneous distributed strain and temperature measurement,” *Applied Optics*, tom 38, nr 25, pp. 5372-5377, September 1999.
- [38] M. Nikles, B. Vogel, F. G. S. Briffod, F. Sauser, S. Luebbecke, A. Bals i T. Pfeiffe, „Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring,” w *Proceedings of the 11th SPIE Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, 2004.
- [39] www.ozoptics.com. [Online].
- [40] P. Gąsior, J. Kaleta i L. Poprawski, „Monitorowanie stanu technicznego obiektów hydrotechnicznych z wykorzystaniem systemów SHM,” w *Bezpieczeństwo zapór - nowe wyzwania*, J. Winter, A. Kosik i A. Wita, Redaktorzy, Warszawa, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Państwowy Instytut Badawczy, 2011, pp. 159-172.
- [41] K. Parylak i W. Wolski, „Oceny stanu technicznego budowli piętrzących w Polsce w świetle standardów Unijnych,” w *XXII Konferencja naukowo - techniczna - Awarie Budowlane*, Szczecin-Międzyzdroje, 2007.
- [42] D. Inaudi i B. Glisic, „Continuous monitoring of concrete bridges during construction and service as a tool for data-driven Bridge Health Monitoring,”

w *IABMAS'06 The Third Int'l Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Porto, 2006.

- [43] B. Glisic i D. Inaudi, „Finite element structural monitoring concept,” w *The 2nd fib Congress*, Naples, 2006.
- [44] D. Inaudi i B. Glisic, „Application of distributed Fiber Optic Sensory for SHM,” w *2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII-2'2005*, Shanzhen, 2005.
- [45] D. Inaudi i R. Walder, „Integrated Structural Health Monitoring Systems for High-Rise Buildings,” w *First Middle East Conference on Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, Dubai, 2011.
- [46] A. Del Grosso, A. Torre, M. Rosa i B. Lattuada, „Application of SHM techniques in the restoration of historical buildings: the Royal Villa of Monza,” w *2nd European Conference on Health Monitoring*, Munich, 2004.
- [47] B. Glisic, D. Inaudi, J. Lau, Y. Mok i C. Ng, „Long-term monitoring of high-rise buildings using long-gage fiber optic sensors,” w *7th International conference on multi-purpose high-rise towers and tall buildings*, Dubai, 2005.
- [48] M. Cerulli, D. Posenato, D. Inaudi, B. Glisic i S. Vurpillot, „ EXPO 02 Piazza Pinocchio: Monitoring visitor's live loads,” w *SPIE Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, 2003.
- [49] J. Biliszczyk, W. Barcik i R. Sieńsko, „System monitorowania mostu w Puławach,” *Mosty* , nr 4, pp. 12-17, 2009.
- [50] R. Sieńko, „Systemy monitorowania obiektów mostowych,” *Materiały Budowlane*, nr 4, pp. 1-2, 2008.
- [51] D. Inaudi i J. Church, „Paradigm Shifts in Monitoring Levees and Earthen Dams: Distributed Fiber Optic Monitoring Systems,” w *31st USSD Annual Meeting & Conference*, San Diego, 2011.
- [52] K. Radzicki, „Zastosowanie termomonitoringu do detekcji przecieków oraz erozji wewnętrznej w ziemnych budowlach piętrzących,” w *Bezpieczeństwo zapór - nowe wyzwania*, J. Winter, A. Kosik i A. Wita, Redaktorzy, Warszawa, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Państwowy Instytut Badawczy, 2011.
- [53] O. Artières, M. Galiana, P. Royet, Y. C. P. Beck, J. Courivaud, J. Fry, Y. Faure i C. Guidoux, „Fiber optics monitoring solutions for canal dykes,” w *IANC MMX Liverpool Congress*, Liverpool, 2010.
- [54] B. Glisic, D. Inaudi, P. Kronenberg i S. Vurpillot, „Dam monitoring using long gage SOFO sensors,” w *Hydropower*, Gmunden, 1999.

- [55] P. Kronenberg, N. Casnaova, D. Inaudi i S. Vurpillot, „Dam monitoring with fiber optics deformation sensors,” w *SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, San Diego, 1997.
- [56] www.roctest-group.com. [Online].
- [57] O. Artières, Y. K. Beck, P. Cunat, J. Fry, J. Courivaud, C. Guidoux i P. Pinettes, „Assessment of dams and dikes behaviour with a fibre optics based monitoring solution,” w *II internationa Congress on Dam Maintance and Rehabilitation*, Zaragoza, 2010.
- [58] O. Artières, Y. Beck, J. Fry, C. Guidoux i P. Pinettes, „Monitoring of Earthdams Leaks and Stability with Fibre-Optics based Monitoring System,” w *8th ICOLD European Club*, Innsbruck, 2010.
- [59] www.ijkdijk.eu. [Online].
- [60] www.tencate.com. [Online].
- [61] P. Gąsior, A. Przygoda i M. Twardawa, „Monitorowanie rurociągów rozłożonymi czujnikami światłowodowymi,” w *Energetyka - Zeszyt tematyczny XXI*, 2010.
- [62] „Dziennik Ustaw z 2000 r. Nr 98 poz.1067”.
- [63] „Dziennik Ustaw z 2003 r. Nr 1 poz. 8”.
- [64] D. Inaudi, B. Glisic, A. Figini i R. Walde, „Pipeline Leakage Detection and Localization Using Distributed Fiber Optic Sensing,” w *Rio Pipeline Conference & Exposition*, Rio de Janeiro, 2007.
- [65] D. Inaudi, R. Belli i R. Walder, „Detection And Localization Of Micro-Leakages Using Distributed Fiber Optic Sensing,” w *7th International Pipeline Conference, IPC2008*, 2008.
- [66] D. Inaudi i B. Glisic, „Distributed Fibre Optic Sensing for Long-Range Pipeline Monitoring,” w *The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure - SHMII-3*, 2007.
- [67] L. Zou, X. Bao, F. Ravet i L. Chen, „Distributed Brillouin fiber sensors for detecting pipeline buckling in an energy pipe under internal pressure,” *Applied Optics*, tom 45, nr 14, pp. 3372-3377, 2006.
- [68] D. Inaudi i B. Glisic, „Long-Range Pipeline Monitoring By Distributed Fiber Optic Sensing,” w *6th International Pipeline Conference*, Calgary, 2006.
- [69] L. Zou i M. Feng, „Detection of micrometer crack by Brillouin-scattering-based distributed strain and temperature sensor,” *Proc. of SPIE Vol. 700419-1*, 2008.
- [70] L. Zou i O. Sezerman, „Pipeline corrosion monitoring by fiber optic distributed strain and temperature sensors,” w *Nace International Corrosion*, 2008.

- [71] L. Zou, G. Ferrier, S. Afshar, Q. Yu, L. Chen i X. Bao, „Distributed Brillouin scattering sensor for discrimination of wall-thinning defects in steel pipe under internal pressure,” *Applied Optics*, tom 43, nr 7, pp. 1583-1588, 2004.
- [72] P. Gąsior, J. Kaleta, M. Przygoda i M. Twardawa, „Strain analysis of composite pipelines using optical fiber sensors in power engineering constructions,” w *Danubia-Adria Symposium*, Sifok, 2011.
- [73] P. Gąsior, Czujnik światłowodowy do monitorowania wytrzymałości materiałów kompozytowych, Wrocław, 2005.
- [74] S. Ochelski, Metody doświadczalne mechaniki kompozytorów, Warszawa: WNT, 2004.
- [75] J. Sloan, „Carbon Fiber: UP!,” March 2010. [Online]. Available: <http://www.compositesworld.com/articles/carbon-fiber-up>.
- [76] T. Jang, J. Lee, D. Lee i J. Huh, „The mechanical behavior of optical fiber sensor embedded within the composite laminate,” *Journal of Materials Science*, nr 34, pp. 5853-5860, 1999.
- [77] K. Kuang, R. Kenny, M. Whelan, W. Cantwell i P. Chalker, „Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials,” *Composites Science and Technology*, nr 61, p. 1379-1387, 2001.
- [78] D. Lee, J. Lee i S. Yun, „The mechnaical characterristics of smart composite structures with embedded optical fiber sensors,” *Composite Structure*, nr 32, pp. 39-50, 1995.
- [79] J. Leng i A. Asundi, „Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors,” *Sensors and Actuators*, tom A, nr 103, pp. 330-340 , November 2003.
- [80] M. Majumder, T. Gangopadhyay, A. Chakraborty, K. Dasgupta i D. Bhattacharya, „Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications,” *Sensors and Actuators*, tom A, nr 147, p. 150-164, 2008.
- [81] H. Sekine, S. Fujimoto, T. Okabe, N. Takeda i T. Yokobori, „Structural Health Monitoring of Cracked Aircraft Panels Repaired with Bonded Patches Using Fiber Bragg Grating Sensors,” *Appl Compos Mater*, nr 13, p. 87-98, 2006.
- [82] Y. Shenfang, H. Rui, L. Xianghua i L. Xiaohui, „Determination of Internal Strain in 3-D Braided Composites Using Optic Fiber Strain Sensors,” *Acta Mechanica Sinica*, tom 17, nr 1, pp. 52-57, March 2004.
- [83] N. Takeda, Y. Okabe, J. Kuwahara, S. Kojima i T. Ogisu, „Development of smart composite structures with small-diameterfiber Bragg grating sensors for damage detection:Quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using

- Lamb wave sensing," *Composites Science and Technology*, nr 65, p. 2575–2587, 2005.
- [84] A. L. Kalamkarov, S. Fitzgerald, D. MacDonald i A. Georgiade, „On the processing and evaluation of pultruded smart composites," *Composites*, tom B, nr 30, pp. 753-763, 1999.
 - [85] Y. Shenfang, L. Xianghua i L. Xiaohui, „Inner strain determination of three-dimensional braided preforms with co-braided optical fiber sensors," *Front. Mech. Eng. China*, tom 3, nr 4, pp. 416-420, 2008.
 - [86] E. Udd, M. Winz, S. Kreger i D. Heider, „Failure Mechanisms of Fiber Optic Sensors Placed in Composite Materials," w *Smart Structures and Materials 2005: Smart Sensor Technology and Measurement Systems, Proc. of Spie Proceedings Vol. 5758*, San Diego, 2005.
 - [87] Z. Zhou, J. P. Ou i B. Wang, „Smart FRP-OFGB bars and their application in reinforced concrete beams," w *Proceedings of 1st International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, Tokyo, 2003.
 - [88] W. Błażejowski, P. Gąsior, J. Kaleta i A. Sankowska, „Optical fiber sensors integrated with composite material based constructions," w *Lightguides and Their Applications III, Krasnobród, Poland, 4-7 October 2006 / Jan Wójcik, Waldemar Wójcik, SPIE Proceedings Series*, 2007.
 - [89] W. Błażejowski, P. Gąsior, J. Kaleta, J. Mażulis i R. Rybczyński, „Wzmocnienie konstrukcji stalowej materiałami kompozytowymi," w *Polimery i kompozyty konstrukcyjne*, G. Wróbel, Red., Cieszyn, Logos Press, 2011, pp. 26-33.
 - [90] www.en.wikipedia.org/wiki/Boeing_787. [Online].
 - [91] K. Diamanti, J. Hodgkinson i C. Soutis, „Damage detection of composite laminates using PZT generated Lamb waves," w *Proc. of the First European Workshop on Structural Health Monitoring*, Paris, 2002.
 - [92] I. Takahashi, K. Sekine, H. Takeya, Y. Iwahori, N. Takeda i Y. Koshioka, „Life cycle structural health monitoring of airframe structures by strain mapping using FBG sensors," w *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010, Proc. of SPIE Vol. 7647 764723-1*, San Diego, 2010.
 - [93] M. Todd, „Optical-Based Sensing," w *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
 - [94] N. Takeda, „Towards damage and structural health monitoring of aerospace composite structures using fibre optics sensors," w *Proceedings of the 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring*, Granada, 2006.
 - [95] J. Mendez i A. Guemes, „SHM Using Fiber Sensors in Aerospace Applications,"

w *18th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Cancun, 2006.

- [96] B. Childers, F. M.E., S. Allison, T. Moore, D. Hare, C. Batten i D. Jegley, „Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four eight-meter optical fibers during static load tests of a composite structure,” w *Smart Structures and Materials 2001, Proceedings of the SPIE Conference*, San Diego, 2001.
- [97] H. Speckmann i R. Henrich, „Structural Health Monitoring (SHM) - Overview on technologies under development,” w *16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT*, Montreal, 2004.
- [98] E. Udd, S. Kreger, S. Calvert, M. Kunzler i K. Davol, „Usage of Multi-Axis Fiber Grating Strain Sensors to Support Nondestructive Evaluation of Composite Parts and Adhesive Bond Lines,” w *Structural Health Monitoring Workshop, Stanford University, DEStech Publications*, 2003.
- [99] C. Boller, F. Chang i Y. Fujino, „Encyclopedia of Structural Health Monitoring,” John Wiley and Sons Ltd., 2009.
- [100] M. Sulatisky, B. Hay i D. Mourre, „Damage Detection in High-Pressure Cylinders,” w *18th World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2010)*, Essen, 2010.
- [101] R. Foedinger, D. Rea, J. Sirkis, C. Baldwin, J. Troll, R. Grande, C. Davis i T. VanDiver, „Embedded fiber optic sensor arrays for structural health monitoring of filament wound composite pressure vessels,” w *Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, Proc. of SPIE Vol. 3670*, Newport Beach, 1999.
- [102] J. Degrieck, W. De Waele i P. Verleysen, „Monitoring of fibre reinforced composites with embedded optical fibre Bragg sensors, with application to filament wound pressure vessels,” *NDT&E International*, tom 34, pp. 289-296, 2001.
- [103] H. Hernández-Moreno, F. Collombet, B. Douchin, D. Choqueuse i P. Davies, „Entire Life Time Monitoring of Filament Wound Composite Cylinders Using Bragg Grating Sensors III In-Service External Pressure Loading,” *Appl Compos Mater*, nr 16, p. 135-147, 2009.
- [104] W. Błażejowski, A. Czulak, P. Gasior, J. Kaleta i R. Mech, „SMART composite high pressure vessels with integrated optical fiber sensors,” w *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010, Proc. of SPIE Vol. 7647 764712-1*, San Diego, 2010.
- [105] W. Błażejowski, P. Gąsior i J. Kaleta, „Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe: aktualne aspekty w zakresie wymagań, projektowania i badań,” w *Materiały polimerowe. Pomerania-Plast 2007. Streszczenia, Szczecin-Kołobrzeg, 23-25 maja 2007*, Szczecin, 2007.

- [106] B. Glisic i D. Inaudi, „Health monitoring of a full composite CNG tanks using long-gage fiber optic sensors,” w *11th SPIE's Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Proc. of Spie Vol. 5384-7*, San Diego, 2004.
- [107] C. Frias, H. Faria, O. Frazão, P. Vieira i A. Marques, „Manufacturing and testing composite overwrapped pressure vessels with embedded sensors,” *Materials and Design*, nr 31, p. 4016–4022, 2010.
- [108] J. Hao, J. Leng i Z. Wei, „Non-destructive Evaluation of Composite Pressure Vessel by Using FBG Sensors,” *Chinese Journal of Aeronautics*, tom 20, nr 2, pp. 120-123, 2007.
- [109] M. Schwartz, *Encyclopedia of Smart Materials*, John Wiley & Sons Ltd., 2002.
- [110] J. Kaleta, D. Lewandowski, R. Mech i P. Gąsior, „Magnetomechanical properties of Terfenol-D powder composites,” *Solid State Phenomena*, tom 154, pp. 35-40, 2009.
- [111] P. Gąsior, J. Kaleta, D. Lewandowski i R. Mech, „Fiber Bragg gratings application for strain measurements of Terfenol-D based composites,” w *SMART'09: Proceedings of the IV ECCOMAS thematic conference on Smart Structures and Materials*, Porto, 2009.
- [112] C. Yin Lo, S. Wing Or i H. Lai Wa Chan, „Large Magnetostriction in Epoxy-Bonded Terfenol-D Continuous-Fiber Composite With [112] Crystallographic Orientation,” *IEEE Transactions on Magnetics*, tom 42, nr 10, pp. 3111 - 3113, 2006.
- [113] www.smart-pipe.com. [Online].
- [114] K. Bethel, S. C. Catha, M. F. Kenninen, R. B. Stonesifer, K. Charbonneau, A. Ekelund, I. Mandich, R. McIntosh i W. D. Stringfellow, „The Development and Validation of a High Strength, Self Monitoring, Composite, Tight Fit Liner for Offshore Pipelines and Risers,” w *Fourth International Conference on Composite Materials and Structures for Offshore Operations (CMOO-4)*, Houston, 2005.
- [115] K. Bethel, S. C. Catha, M. F. Kenninen, R. B. Stonesifer, K. Charbonneau, A. Ekelund, I. Mandich, R. McIntosh i W. D. Stringfellow, „The design, development and validation of an innovative high strength, self monitoring, composite pipe liner for the restoration of energy transmission pipelines,” w *6th International Pipeline Conference (IPC2006)*, Calgary, 2006.
- [116] S. Peters, *Handbook of Composites*, 2 red., London: Chapman & Hall, 1998.
- [117] P. Soden, R. Kitching, P. Tse, Y. Tsavalas i M. Hinton, „Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound composite tubes subjected to uniaxial and biaxial loads,” *Composites Science and Technology*, nr 46, pp. 363-378, 1993.

- [118] W. Hufenbach, R. Böhm, L. Kroll i A. Czulak, „Braided composite pipe elements for applications in chemical apparatus engineering,” w *15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15)*, Durban, 2005.
- [119] W. Błażejowski, A. Czulak, P. Gąsior, T. Pawlak i W. Hufenbach, „Ciśnieniowe badania kompozytowych próbek rurowych wykonanych metodą wyplatania,” *Kompozyty*, tom 9, nr 3, pp. 291-296, 2009.
- [120] A. Czulak, W. Hufenbach, W. Błażejowski i P. Gąsior, „Badania porównawcze kompozytowych próbek rurowych,” w *XXIII Sympozjum mechaniki eksperymentalnej ciała stałego, Jachranka, 15-18 października 2008*, Warszawa, 2008.
- [121] W. Błażejowski, Wpływ struktury nawijania włókna na wytrzymałość elementów walcowych wykonanych z kompozytu epoksydowo-szklanego, Wrocław: Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Promotor: dr hab. inż. Radosław Iwankiewicz, 1999.
- [122] T. Czapliński, P. Gąsior i A. Przygoda, „Modelowanie optycznego systemu monitorowania procesu pęknięcia kompozytu długowłóknistego,” w *Zmęczenie i mechanika pęknięcia. Materiały XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pęknięcia, Bydgoszcz-Pieczyska, 23-26 maja 2006*, Bydgoszcz, 2006.
- [123] W. Błażejowski, P. Gąsior i A. Przygoda, „Monitorowanie i symulacja defektu w kompozytowych obiektach cylindrycznych,” *Prace Naukowe - Politechnika Warszawska. Mechanika. Badania eksperymentalne w mechanice ciała stałego*, nr 217, pp. 13-18, 2007.
- [124] A. Sankowska, P. Gąsior, W. Błażejowski i M. Sipura, „Czujniki światłowodowe do monitorowania stanu wyężenia włóknistych materiałów kompozytowych,” w *Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne. COE 2006. IX Konferencja naukowa. Materiały konferencyjne, Kraków-Zakopane, 19-22 czerwca 2006*, Kraków, 2006.
- [125] I. Małecki i J. Ranachowski, Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania., Warszawa: PASCAL Publications, 1994.
- [126] W. Błażejowski, P. Gąsior i J. Kaleta, „Lekkie, wysokociśnieniowe, kompozytowe, monitorowane zbiorniki do paliw gazowych w pojazdach,” *Przegląd mechaniczny*, nr 1, pp. 13-20, 2011.
- [127] www.ingas-eu.org. [Online].
- [128] www.xperion-energy.de. [Online].
- [129] ISO/DIS15869.3, „Gaseous hydrogen and hydrogen blends — Land vehicle fuel tanks,” 2008.
- [130] W. Błażejowski, P. Gąsior i J. Kaleta, „Bezpieczeństwo użytkowania zbiorników

wysoko sprężonych paliw gazowych," w *Gaz ziemny do napędu silników pojazdów maszyn i urządzeń: III konferencja naukowo-techniczna, Wałbrzych, 4-5 czerwca 2009.*, Wrocław: SIMP Ośrodek Doskonalenia Kadr, 2009.

- [131] W. Błażejowski, A. Gasperowicz, P. Gąsior i J. Kaleta, „Zbiorniki kompozytowe dla CNG i wodoru, wymogi homologacyjne i metody badań. Cz. 2,” *Czas na Gaz!*, nr 20, pp. 24-25, 2007.
- [132] G. Mair, „Potentials and Procedures of the Probabilistic Approach,” 2007. [Online]. Available: http://www.storhy.net/pdf/PotentialProbabilisticApproach_Mair.pdf.
- [133] W. Błażejowski, P. Gąsior, A. Sankowska i M. Urbanowicz, „Pomiary odkształceń oplotów nośnych zbiorników kompozytowych,” w *Materiały polimerowe. Pomerania-Plast 2007. Streszczenia, Szczecin-Kołobrzeg, 23-25 maja 2007, Szczecin, 2007*.
- [134] W. Błażejowski, P. Gąsior, J. Kaleta i R. Rybczyński, „Wyznaczanie odkształcenia resztkowego oraz próba karbu w kompozytowych zbiornikach wysokociśnieniowych,” *Czasopismo Techniczne - Politechnika Krakowska. Mechanika.*, nr z. 1-M, pp. 19-22, 2009.
- [135] W. Błażejowski, P. Gąsior i J. Kaleta, „Aspekty bezpieczeństwa w zakresie ciśnieniowego magazynowania wodoru w zbiornikach samochodowych,” *Biuletyn Polskiego Stowarzyszenia Wodoru i Ogniw Paliwowych*, nr 5, pp. 22-28, 2010.
- [136] W. Błażejowski, P. Gąsior, J. Kaleta i P. Kotowski, „Quasistatyczna próba rozrywania butli kompozytowych do gromadzenia paliw gazowych pod dużym ciśnieniem,” w *XXIII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego Jachranka*, Warszawa, 2008.
- [137] W. Błażejowski, P. Gąsior, J. Kaleta i A. Sankowska, „Optical Fiber Sensors as NDT methods for strain state monitoring of high pressure composites vessels.Comparison of different types of OFS.,” w *8th International Conference on Durability of Composite Systems - Duracosys*, Porto, 2008.
- [138] W. Błażejowski, P. Gąsior, J. Kaleta i A. Sankowska, „Aplikacja światłowodowych metod czujnikowych do monitorowania ekstremalnie wyężonych konstrukcji kompozytowych,” w *I Kongres Mechaniki Polskiej. KMP 2007, Warszawa, 28-31 sierpnia 2007 / Red. J. Kubik, W. Kurnik, W. K. Nowacki*, Warszawa, 2007.
- [139] P. Gąsior, J. Kaleta i A. Sankowska, „Optical fiber sensors in health monitoring of composite high pressure vessels for hydrogen,” w *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, Proc. of SPIE 66163G-1-66163G-10*, Munich, 2007.
- [140] P. Chou i R. Croman, „Degradation and Sudden-Death Models of Fatigue of Graphite/Epoxy Composites,” w *5th Conference on Composite Materials: Testing and Design*, New Orleans, 1979.

- [141] K. Schulte, „Damage monitoring in polymer matrix structures,” *Journal de Physique IV*, tom 3, pp. 1629-1636, 1993.
- [142] W. Hufenbach, A. Czulak, W. Błażejowski i P. Gąsior, „Wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe wzmocnione wyplotem z włókna szklanego ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi,” *Kompozyty*, tom 9, nr 2, pp. 107-111, 2009.
- [143] A. Czulak, Kształtowanie struktury i właściwości kompozytowych elementów rurociągów wyplatanych z włókna szklanego, praca doktorska, 2011.
- [144] S. Peters, Handbook of Composites, 2 red., London: Chapman & Hall, 1998.
- [145] W. Błażejowski, „Metodyka doboru struktury kompozytowego oplotu nośnego zbiorników wytwarzanych metodą nawijania,” *Czasopismo Techniczne. Mechanika*, tom 106, nr 1, pp. 9-14, 2009.
- [146] W. Błażejowski, „Zastosowanie metody tablicowej w projektowaniu oplotu kompozytowego butli wysokociśnieniowych,” *Kompozyty*, tom 10, nr 2, pp. 154-158, 2010.
- [147] W. Błażejowski, Wpływ struktury nawijania włókna na wytrzymałość elementów walcowych wykonanych z kompozytu epoksydowo-szklanego, Wrocław: Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Promotor: dr hab. inż. Radosław Iwankiewicz, 1999.
- [148] W. Błażejowski, „Designing of composite manufacturing by the winding method,” *Studia Geotechnica et Mechanica*, tom XXIII, nr 1-2, p. 33 – 42, 2001.
- [149] W. Błażejowski, „Sprawozdanie merytoryczne z wykonania projektu badawczego nr N N508 477534. Metodyka doboru struktury kompozytowego oplotu nośnego butli wytwarzanych metodą nawijania, przeznaczonych na wysokosprężone paliwa gazowe,” Wrocław, 2010.
- [150] J. Aboudi, „Micromechanical Analysis of Composites by the Method of Cells,” *Applied Mechanics Reviews*, tom 42, nr 7, pp. 193-221, 1989.
- [151] M. Pindera i B. Bednarczyk, „An efficient implementation of the generalized method of cells for unidirectional, multi-phased composites with complex microstructures,” *Composites Part B Engineering*, tom 30, nr 1, pp. 87-105, 1999.
- [152] S. Lomov, D. Ivanov, I. Verpoest, M. Zako, T. Kurashiki, H. Nakai i S. Hirose, „Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms,” *Composites Science and Technology*, nr 67, p. 1870–1891, 2007.
- [153] T. Czapliński, Ł. Maciejewski, A. Przygoda i G. Ziętek, „A model of textile reinforced composite; homogenisation and identification,” w *18th Conference on CMM*, Zielona Góra, 2009.

- [154] T. Czapliński, Ł. Maciejewski, A. Przygoda i G. Ziętek, „Homogenizacja i identyfikacja kompozytu epoksydowego zbrojonego włóknem szklanym,” w *Mechanika ośrodków niejednorodnych : III konferencja naukowa*, Zielona Góra - Łagów, 2010.
- [155] W. Kasprzak, B. Lysik i M. Rybaczuk, *Measurements, Dimensions, Invariant Models and Fractals*, Wrocław-Lviv: Spolom, 2004.
- [156] M. Rybaczuk, „HyCOMP project technical report - Modelling of fibres breaking process in composites,” 2011.
- [157] J. Czopor i M. Rybaczuk, „Fibers breaking process in composites models and numerical simulations applying cellular automata,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, nr 52, p. 154–157, 2009.
- [158] M. Rybaczuk i P. Stoppel, „The fractal growth of fatigue defects in materials,” *International Journal of Fracture*, nr 103, pp. 71-94, 2000.
- [159] D. Aniszewska i M. Rybaczuk, „Fractal characteristics of defects evolution in parallel fibre reinforced composite in quasi-static process of fracture,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, nr 52, p. 91–95, 2009.
- [160] D. Aniszewska i M. Rybaczuk, „Physical stability and critical effects in models of fractal defects evolution based on single fractal approximation,” *Chaos, Solitons and Fractals*, nr 32, p. 246–251, 2007.
- [161] M. Rybaczuk i W. Zieliński, „The concept of physical and fractal diemension I. The projective dimensions,” *Chaos, Solitons and Fractals*, nr 12, pp. 2517-2535, 2001.
- [162] M. Rybaczuk, A. Kędzia i W. Zieliński, „The concept of physical and fractal diemension II. The differential calculus in dimensional spaces,” *Chaos, Solitons and Fractals*, nr 12, pp. 2537-2552, 2001.
- [163] P. Gąsior, J. Kaleta i A. Przygoda, „Monitorowanie stanu technicznego kotłów energetycznych,” w *Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów: Międzynarodowa XI Konferencja Kotłowa, ICBT 2010*, Szczyrk, 2010.
- [164] P. Gąsior, J. Kaleta i A. Przygoda, „Structural health monitoring system for a power boiler,” w *Health Monitoring of Structural and Biological Systems, SPIE Proceedings Series ; vol. 7650*, San Diego, 2010.
- [165] P. Gąsior, J. Kaleta i A. Przygoda, „Układ do kontroli naprężeń w konstrukcji kotła przepływowego”. zgłoszenie patentowe nr P.390651, Polska 2010.
- [166] P. Gąsior, A. Przygoda i M. Twardawa, „Monitorowanie rurociągów rozłożonymi czujnikami światłowodowymi,” *Energetyka*, nr 21, pp. 55-58, 2010.
- [167] P. Gąsior, J. Kaleta, A. Przygoda i M. Twardawa, „Strain analysis of composite

- pipelines using optical fiber sensors in power engineering constructions," w *28th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, Siófok, 2011.
- [168] P. Gąsior, J. Kaleta, A. Przygoda i M. Twardawa, „Analiza odkształceń rurociągów kompozytowych z wykorzystaniem czujników światłowodowych,” *Energetyka*, tom 22, pp. 10-12, 2011.
- [169] B. Żmizdiński, Pomiar pola odkształceń w układzie wahaczowym zawieszenia pojazdu typu Formuła Student z użyciem czujników światłowodowych, Wrocław: Praca dyplomowa, 2011.
- [170] M. Drozdowicz, Model światłowodowego czujnika do pomiaru przemieszczeń, Wrocław: Praca dyplomowa, 2006.
- [171] W. Błażejowski, P. Gąsior, R. Rybczyński i K. J. , „Lekkie, wysokociśnieniowe, kompozytowe, monitorowane zbiorniki do paliw gazowych w pojazdach,” *Przegląd Mechaniczny*, tom 70, nr 1, pp. 13-20, 2011.
- [172] W. Błażejowski, P. Gąsior i J. Kaleta, „Application of Optical Fibre Sensors to Measuring the Mechanical Properties of Composite Materials and Structures,” w *Advances in Composite Materials - Ecodesign and Analysis*, B. Attaf, Red., InTech, 2011.
- [173] Y. Cao i M. Wang, „Structural behavior of a cable stayed bridge through the use of a long-term health monitoring system,” w *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security*, San Diego, 2010.
- [174] P. Gąsior, W. Błażejowski i J. Kaleta, „Smart fibre optic methods for structural health monitoring of high pressure vessels for hydrogen storage,” w *WHEC - World Hydrogen Energy Conference*, Essen, 2010.
- [175] J. Kaleta, W. Błażejowski, P. Gąsior i M. Rybaczuk, „Optimisation of the IV generation tanks for hydrogen storage applied in vehicles. Modelling and experiment,” w *WHEC - World Hydrogen Energy Conference*, Essen, 2010.
- [176] B. Joo, Y. Yoo, C. Lee, K. Park i Y. Hwang, „Monitoring System of Arch Bridge for Safety Network Management,” w *Health Monitoring of Structural and Biological Systems*, San Diego, 2010.
- [177] J. Liu i Q. Zhang, „Dynamic characteristics of a thousands-meter scale cable-stayed bridge,” w *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, San Diego, 2010.
- [178] J. Czopor i M. Rybaczuk, „Fibers breaking process in composites models and numerical simulations applying cellular automata,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, tom 52, pp. 154-157, 2009.

- [179] D. Inaudi i B. Glisic, „Overview of 40 Bridge Monitoring Projects Using Fiber Optic Sensors,” K. & Frangopol, Red., London, Taylor & Francis, 2008.
- [180] R. Mech, Badanie właściwości magnetomechanicznych kompozytów na bazie proszków z materiałów o gigantycznej magnetostrykcji, Wrocław: Praca dyplomowa, 2008.
- [181] E. Kaczmarzyk, Czujniki światłowodowe do badań wytrzymałości konstrukcji mechanicznych wzmacnianych elementami z materiałów kompozytowych, Wrocław: Praca dyplomowa, 2006.
- [182] B. Glisic, D. Inaudi, J. Lau, Y. Mok i C. Ng, „Long-term monitoring of high-rise buildings using long-gage fiber optic sensors,” w *7th International conference on multi-purpose high-rise towers and tall buildings*, Dubai, UAM, 2005.
- [183] J. Braunstein, J. Ruchala i B. Hodac, „Smart structures: fiber-optic deformation and displacement monitoring,” w *First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - IABMAS*, Barcelona, 2002.
- [184] ISO11439:2000(E), „Gas cylinders — High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles,” 2000.

Spis ilustracji

Rys. 2.1. Idea działania czujnika standardowego z pojedynczym przetwarzaniem (a) oraz czujnika światłowodowego z podwójnym przetwarzaniem (b) [5].	21
Rys. 2.2. Klasyfikacja czujników (systemów) ze względu na wielkość mierzonego zewnętrznego pola fizycznego (na podst. [13]).	25
Rys. 2.3. Zasada działania światłowodowej siatki Bragga [14].	27
Rys. 2.4. Przykładowe zmiany długości fali Bragga pod wpływem odkształceń i temperatury.	29
Rys. 2.5. Schemat systemu interferometrycznego układu pomiarowego firmy Smartec (na podst.: [20]).	31
Rys. 2.6. Schemat układu światłowodowego interferometru Fabry – Perota (na podst.: [12, 14]).	33
Rys. 2.7. Idea punktowego czujnika mikrougięciowego z v-rowkami (na podst. [26]). ..	35
Rys. 2.8. Budowa głowicy mikrougięciowej (na podst. [23]).	35
Rys. 2.9. Zmiana mocy optycznej propagowanej w układzie pomiarowym z czujnikiem mikrougięciowym w funkcji odkształcenia czujnika [32].	36
Rys. 2.10. Rozpraszanie światła w światłowodzie (na podst.: [10]).	38
Rys. 2.11. Rozpraszanie Ramana: zmiana natężenia fali anty-Stokesa pod wpływem zmian temperatury otoczenia (na podst.: [10]).	38
Rys. 2.12. Zależność zmian częstotliwości wymuszonego rozpraszania Brillouina pod wpływem temperatury (a) oraz odkształceń (b) (na podst. [37]).	40
Rys. 2.13. Przykładowa zależność zmiany częstotliwości Brillouina pod wpływem lokalnej zmiany temperatury światłowodu przed (a) i po jego podgrzaniu (b) [38].	41
Rys. 2.14. Topologie instalacji czujników w systemach SHM: prosta (a), równoległa (b) oraz krzyżowa (c); koncepcja firmy SMARTEC, na podst. [10].	48
Rys. 2.15. Idea systemu SHM dla północnego mostu Młyńskiego we Wrocławiu [opracowanie własne].	50
Rys. 2.16. Schematyczne rozmieszczenie czujników w obrębie zapory ciężkiej w przekroju (koncepcja firmy SMARTEC, na podst. [51]).	52
Rys. 2.17. Idea monitorowania wałów z wykorzystaniem czujników rozłożonych (koncepcja firmy SMARTEC, na podst. [51]).	53
Rys. 2.18. Idea instalacji światłowodowych czujników rozłożonych do monitorowania rurociągów.	56
Rys. 3.1. Przykładowa lokalizacja czujnika światłowodowego OFS pomiędzy kolejnymi warstwami laminatu kompozytowego $[0_3/90_3/OFS/90_3/0_3]$ (na podst.: [76]).	60
Rys. 3.2. Wyplatanie materiału kompozytowego ze zintegrowanym czujnikiem światłowodowym (na podst. [82]).	60

Rys. 3.3. Schemat powstawania lokalnych defektów w laminatach kompozytowych z zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi (na podst. [9]).	61
Rys. 3.4. Widok kompozytu węglowo-epoksydowego z wbudowanym światłowodem: równoległe (a) oraz prostopadłe (b) do włókien wzmocnienia (na podst. [86]).	61
Rys. 3.5. Przesunięcie widma odbiciowego pochodzącego od czujników FBG w trakcie produkcji laminatów kompozytowo-aluminiowych o kilku warstwach ułożonych pod różnymi kątami względem siebie (a) oraz laminatu jednokierunkowego (b) (na podst.: [77]).	62
Rys. 3.6. Testowe belki ze wzmocnieniami kompozytowymi (a), wykonanymi metodą laboratoryjną (1) oraz przez firmę Polskie Mosty (2), a także charakterystyki (b) uzyskane przy zastosowaniu czujnika mikrougięciowego oraz FBG dla belki z komercyjnym wzmocnieniem kompozytowym [88].	65
Rys. 3.7. Próba 4-punktowego zginania belki stalowej wzmocnionej jednokierunkowym kompozytem węglowo-epoksydowym ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi FBG (a) oraz porównanie uzyskanych wyników pomiarowych dla różnych wzmocnień (b) [89].	66
Rys. 3.8. Model geometryczny z zaznaczonymi defektami (a) oraz numeryczny MES (b) kompozytowej przegrody ciśnieniowej, stosowanej w obliczeniach rozkładu pola odkształceń, dla obciążenia występującego w trakcie lotu (na podst.: [92]).	68
Rys. 3.9. Wynik obliczeń numerycznych rozkładu pola odkształceń dla przegrody ciśnieniowej z odspojonym wzmocnieniem (a) oraz przegrody po lokalnym uderzeniu (b) (na podst.: [92]).	69
Rys. 3.10. Rozmieszczenie czujników FBG do detekcji uszkodzeń na kompozytowej przegrodzie ciśnieniowej (na podst.: [92]).	69
Rys. 3.11. Okablowanie strukturalne dla czujników tensometrycznych (a) oraz światłowodowych –	70
Rys. 3.12. Wytwarzanie zbiornika kompozytowego metodą nawijania z wbudowanymi w strukturę nośną czujnikami FBG (na podst.: [102]).	72
Rys. 3.13. Przykładowe wyniki pomiarów zmian długości fali Bragga pod wpływem zmian ciśnienia wewnętrznego w zbiorniku w funkcji czasu trwania eksperymentu dla próby statycznej (a) oraz cyklicznej (b) (na podst.: [102]).	73
Rys. 3.14. Widok ciśnieniowego zbiornika kompozytowego ze zintegrowanymi czujnikami FBG w trakcie procesu nawijania (a) oraz jego model numeryczny (b) (na podst.: [8]).	74
Rys. 3.15. Odkształcenia zbiornika kompozytowego zarejestrowane przez czujniki FBG oraz tensometryczne w funkcji ciśnienia wewnętrznego w trakcie quasi-statycznej próby ciśnieniowej (a) oraz rozkład odkształceń w zbiorniku przy ciśnieniu wewnętrznym 500 psi (~34,5 bar) zarejestrowany przez czujniki oraz wyznaczony na podstawie obliczeń numerycznych dla przyjętego modelu (b) (na podst.: [8]).	75

Rys. 3.16. Widok zbiorników kompozytowych typu 4-tego, z zainstalowanymi czujnikami światłowodowymi SOFO®, przeznaczonych do gromadzenia CNG (a) oraz schemat rozmieszczenia czujników na zbiorniku testowym (b) (na podst.: [106]).	76
Rys. 3.17. Wyniki badań testowych zbiorników CNG z zainstalowanymi czujnikami światłowodowymi typu SOFO®:	77
Rys. 3.18. Kompozytowa próbka zawierająca sproszkowany Terfenol-D z zainstalowanym czujnikiem światłowodowym (a) oraz zmiana magnetostrykcji wzdłużnej pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego dla różnych rodzajów próbek: kompozytowych i litych, zarejestrowana przez czujnik FBG (b) (na podst.: [110, 111]).	79
Rys. 3.19. Schemat budowy rurociągu SmartPipe® [113].	80
Rys. 3.20. Rozłożony czujnik światłowodowy SMARTprofile® zintegrowany z konstrukcją (a) oraz proces wyplatania rurociągu kompozytowego (b) [114].	81
Rys. 4.1. Geometria kompozytowej próbki rurowej [5], szczegółowy widok próbki z naklejonymi czujnikami FBG oraz widok stanowiska pomiarowego (1 – próbka, 2 – urządzenie pomiarowe FBG, 3 – maszyna wytrzymałościowa).	83
Rys. 4.2. Zmiana odkształceń obwodowych oraz przemieszczenie tłoka maszyny wytrzymałościowej w funkcji przyłożonej siły dla próbek o geometrii 30° (a), 45° (b) oraz 60° (c).	85
Rys. 4.3. Widmo odbiciowe pochodzące od trzech czujników FBG zainstalowanych na badanej próbce 30° (widoczne przesunięcie pików po badaniach świadczące o trwałym uszkodzeniu próbki), a także widok badanej próbki w momencie jej zniszczenia (widoczne zabielenie matrycy).	87
Rys. 4.4. Zestawienie wartości średnich odkształceń dla trzech rodzajów próbek kompozytowych: 30°, 45° i 60° w funkcji obciążenia.	88
Rys. 4.5. Analiza porównawcza odkształceń obwodowych próbki o strukturze 30°.	89
Rys. 4.6. Kompozytowa próbka rurowa przygotowana do badań (a) oraz jej model numeryczny (b).	90
Rys. 4.7. Symulacje numeryczne kompozytowej próbki rurowej ze zintegrowanym światłowodowym czujnikiem amplitudowym:	91
Rys. 4.8. Wykres zależności odkształcenia w funkcji ciśnienia dla różnych rodzajów czujników oraz symulacji numerycznej badanej próbki kompozytowej.	92
Rys. 4.9. Stanowisko do symulacji defektów w rurze kompozytowej (a) oraz jego schemat (b).	94
Rys. 4.10. Rozmieszczenie czujników światłowodowych na powierzchni zewnętrznej próbki rurowej.	95
Rys. 4.11. Równoległe pomiary odkształceń przy pomocy FGB4 i FGB3 w różnych punktach obiektu (a) oraz zmiany mocy optycznej (rejestrowane przez mikrougięciową	

głowicę światłowodową) i długości fali Bragga (rejestrowane przez FBG4) w funkcji zmian ciśnienia (b).	96
Rys. 4.12. Widok geometrii obiektu oraz ułożenia poszczególnych materiałów; warstwy stalowa i kompozytowa (a), przykład ułożenia włókien (b).....	97
Rys. 4.13. Rozkład odkształceń w kierunku obwodowym przy quasi-punktowym obciążeniu - rozważania teoretyczne (a) oraz porównanie odkształceń testowej warstwy kompozytowej określonych eksperymentalnie i w wyniku modelowania (b).	97
Rys. 4.14. Widok kompozytowej próbki typu NOL nawiniętej na uchwycie testowym.	98
Rys. 4.15. Widok stanowiska do badania próbek typu NOL oraz widok próbki zamocowanej w uchwytach.	99
Rys. 4.16. Przyrost siły w funkcji czasu trwania eksperymentu (1.75 N/s).	99
Rys. 4.17. Przyrost siły w funkcji czasu trwania eksperymentu (17.5 N/s).	100
Rys. 4.18. Przyrost siły w funkcji czasu trwania eksperymentu (175 N/s).	100
Rys. 4.19. Zmiana przemieszczenia tłoka maszyny wytrzymałościowej pod wpływem przyłożonej siły rozciągającej dla zmiany obciążenia z prędkością 175 N/s.....	101
Rys. 4.20. Moment oderwania się ostatniego pasma wzmocnienia kompozytowego (a) oraz rozerwania (b) testowej próbki NOL.	102
Rys. 4.21. Lokalizacja czujników FBG oraz emisji akustycznej (EA) na próbce typu NOL.	102
Rys. 4.22. Badania quasi statyczne próbki typu NOL przy zmianie obciążania ze stałą prędkością 1,75 kN/s w funkcji czasu:	103
Rys. 4.23. Badania quasi statyczne próbki typu NOL przy zmianie obciążania ze stałą prędkością 1,75 kN/s w wybranym fragmencie czasu:.....	105
Rys. 4.24. Próba na pełzanie próbki typu NOL przez 50 godzin:	107
Rys. 4.25. Próba na pełzanie próbki typu NOL w wybranym fragmencie czasu (tylko pełzanie):.....	108
Rys. 4.26. Próba na pełzanie próbki typu NOL przez 100 godzin:.....	109
Rys. 4.27. Próba na pełzanie próbki typu NOL przez 100 godzin (wybrany fragment czasu):	110
Rys. 4.28. Próba na pełzanie próbki typu NOL przez 100 godzin (wybrany fragment czasu, skala logarytmiczna):.....	110
Rys. 5.1. Schemat budowy wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego typu 3-go lub 4-go [126].	112
Rys. 5.2. Przykłady zbiorników wysokociśnieniowych do gromadzenia CNG i CH ₂ : typu 2-go (a) oraz typu 4-go (b, c, d).	113
Rys. 5.3. Różne typy konstrukcji zbiorników wysokociśnieniowych do gromadzenia paliw gazowych (* - typowa waga zbiornika na 1 litr jego objętości dla zbiorników o nominalnym ciśnieniu pracy)	114

Rys. 5.4. Przykładowy zbiornik hybrydowy firmy Xperion [127, 128].	115
Rys. 5.5. Stanowisko hydrauliczne do badań cyklicznych wysokociśnieniowych zbiorników w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej przed (a) oraz po rozbudowie (b) o dodatkowe multiplikatory zwiększające zakres maksymalnych ciśnień z 450 do 1400 barów.	121
Rys. 5.6. Charakterystyka zmian ciśnienia i temperatury cieczy w trakcie badań cyklicznych, w zakresie 20-875 bar (a) oraz widok zbiornika zainstalowanego w komorze bezpieczeństwa (b).	122
Rys. 5.7. Stanowisko do badań niszczących znajdujące się w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej (a) oraz przykładowe zbiorniki po testach (b).	123
Rys. 5.8. Zmiana ciśnienia w trakcie badań niszczących (ciśnienie niszczące 1428 bar) [136].	124
Rys. 5.9. Koncepcja systemu monitorującego dla wysokociśnieniowego zbiornika.	125
Rys. 5.10. Rozmieszczenie czujników na badanym zbiorniku ciśnieniowym typu 3-go [124].	127
Rys. 5.11. Odształcenia zbiornika oraz zmiana temperatury w trakcie próbnych obciążeń cyklicznych w zakresie ciśnień: 20÷300 barów.	127
Rys. 5.12. Zmiana długości fali Bragga zarejestrowana przez czujnik FBG1, dla różnych wartości ciśnień wewnętrznych.	128
Rys. 5.13. Charakterystyka odkształceń obwodowych mierzona przez światłowodowe siatki Bragga w różnych punktach zbiornika: widok ogólny (a) oraz szczegółowy dla wybranego cyklu (b).	129
Rys. 5.14. Zmiana maksymalnych odkształceń obwodowych (dla $P = 875$ bar) w funkcji liczby cykli obciążeń testowego zbiornika (wraz z powiększeniem zaznaczonych obszarów).	129
Rys. 5.15. Lokalne odkształcenia obwodowe zbiornika rejestrowane przez czujniki FBG (wykres górny) oraz tensometryczne (wykres środkowy), a także sygnał z emisji akustycznej (wykres dolny) w momencie uszkodzenia [139].	130
Rys. 5.16. Analiza uzyskanych wyników pomiarowych dla ostatnich cykli obciążeń zbiornika (detekcja defektów w konstrukcji zbiornika wysokociśnieniowego).	131
Rys. 5.17. Uszkodzenia zbiornika typu 3-go, po przeprowadzonej serii badań cyklicznych.	132
Rys. 5.18. Szczelina zmęczeniowa w stalowym linerze uszkodzonego testowego zbiornika typu 3-go, po przeprowadzonej serii badań cyklicznych.	133
Rys. 5.19. Rozmieszczenie czujników na zbiorniku ciśnieniowym poddanym próbie niszczącej (a) oraz widok zbiornika w komorze bezpieczeństwa przed badaniami (b).	134

Rys. 5.20. Zmiana ciśnienia oraz lokalne odkształcenia zbiornika typu 4-go w trakcie badań niszczących ($P_{\max} = 1428$ barów).....	134
Rys. 5.21. Zmiana objętości cieczy wtłoczonej do zbiornika w trakcie próby niszczącej, w funkcji ciśnienia wewnętrznego ($P_{\max} = 1428$ bar).....	135
Rys. 5.22. Widok zbiornika po badaniach niszczących.	135
Rys. 5.23. Zbiorniki kompozytowe z defektami programowanymi w postaci nacięć.	136
Rys. 5.24. Próba zrzutowa zbiorników kompozytowych.	138
Rys. 5.25. Zbiornik kompozytowy typu 4-go po próbie zrzutowej z zaznaczonymi miejscami uszkodzeń w warstwie kompozytowej.	138
Rys. 5.26. Rozmieszczenie dwunastu światłowodowych siatek Bragga (FBG) na zbiorniku testowym (a) oraz spektrum odbiciowe zainstalowanych czujników (b).	139
Rys. 5.27. Testowy zbiornik z programowanymi defektami w postaci nacięć oraz zainstalowanymi czujnikami światłowodowymi FBG.	139
Rys. 5.28. Lokalne odkształcenia zbiornika testowego mierzone w trakcie statycznej próby ciśnieniowej „step-by-step”.	140
Rys. 5.29. Lokalne odkształcenia obwodowe zbiornika testowego w funkcji ciśnienia wewnętrznego.	141
Rys. 5.30. Wzajemne rozmieszczenie programowanych defektów oraz czujników na zbiorniku testowym.	141
Rys. 5.31. Lokalne odkształcenia zbiornika bez defektu oraz z defektem programowanym, mierzone w przekroju A-A zawierającym krótsze z nacięć.....	142
Rys. 5.32. Lokalne odkształcenia zbiornika bez defektu oraz z defektem programowanym, mierzone w przekroju B-B nie zawierającym żadnego z nacięć.	142
Rys. 5.33. Lokalne odkształcenia zbiornika bez defektu oraz z defektem programowanym, mierzone w przekroju C-C zawierającym dłuższe z nacięć.....	143
Rys. 5.34. Analiza różnic odkształceń pomiędzy pomiarem referencyjnym i pomiarami wykonanymi dla zbiornika z programowanymi defektami.....	144
Rys. 5.35. Rozmieszczenie czujników na zdefektowanym zbiorniku testowym.	144
Rys. 5.36. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika w zakresie ciśnień od 0 do 100 bar.....	145
Rys. 5.37. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika w zakresie ciśnień od 0 do 100 bar mierzone w funkcji czasu w trakcie próby „step-by-step” (a) oraz ciśnienia (b).	146
Rys. 5.38. Rozmieszczenie czujników FBG oraz programowanych defektów na zbiorniku testowym.	146
Rys. 5.39. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika przez jedenaście czujników typu FBG, w zakresie ciśnień od 0 do 150 barów, mierzone w funkcji czasu, w trakcie próby „step-by-step” (a) oraz ciśnienia (b).....	147

Rys. 5.40. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika, mierzone w obrębie dużego nacięcia, przy zmianie ciśnienia od 0 do 150 bar	148
Rys. 5.41. Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika, mierzone w obrębie małego nacięcia, przy zmianie ciśnienia od 0 do 150 bar.	149
Rys. 5.42. Rozmieszczenie czujników FBG oraz defektów (nacięcie i delaminacja) na kompozytowym zbiorniku hybrydowym.	149
Rys. 5.43. Odkształcenia zbiornika zarejestrowane w trakcie próby „step-by-step”, w zakresie ciśnień od 0 do 140 barów.	150
Rys. 5.44. Lokalne odkształcenia zbiornika hybrydowego w funkcji ciśnienia wewnętrznego.	151
Rys. 5.45. Zmiana spectrum odbiciowego od czujników FBG, zainstalowanych na kompozytowym zbiorniku hybrydowym, w trakcie próby quasistatycznej.	151
Rys. 5.46. Lokalne odkształcenia hybrydowego zbiornika kompozytowego, zarejestrowane przez czujniki FBG1÷FBG6, w funkcji ciśnienia wewnętrznego dla kolejnych defektów programowanych.	152
Rys. 5.47. Widok programowanego defektu w postaci delaminacji na powierzchni testowego zbiornika hybrydowego.	153
Rys. 5.48. Analiza wyników pomiaru lokalnych odkształceń zbiornika hybrydowego dla różnych etapów zdefektowania jego struktury kompozytowej (detekcja defektów w konstrukcji zbiornika wysokociśnieniowego).	154
Rys. 5.49. Wartości lokalnych odkształceń zdefektowanego zbiornika, mierzone przez światłowodowe siatki Bragga w przekroju A-A (a) dla ciśnienia 20 bar (min) oraz 258,5 bar (max), a także amplituda lokalnie mierzonych odkształceń (b) w funkcji liczby cyklicznych obciążeń zbiornika, w zakresie 20 – 258,5 bar	155
Rys. 5.50. Wartości lokalnych odkształceń zdefektowanego zbiornika, mierzone przez światłowodowe siatki Bragga w przekroju B-B (a) dla ciśnienia 20 bar (min) oraz 258,5 bar (max), a także amplituda lokalnie mierzonych odkształceń (b) w funkcji liczby cyklicznych obciążeń zbiornika w zakresie 20 – 258,5 bar.	156
Rys. 5.51. Wartości lokalnych odkształceń zdefektowanego zbiornika mierzone przez światłowodowe siatki Bragga w przekroju C-C (a) dla ciśnienia 20 bar (min) oraz 258,5 bar (max), a także amplituda lokalnie mierzonych odkształceń (b) w funkcji liczby cyklicznych obciążeń zbiornika w zakresie 20 – 258,5 bar.	157
Rys. 5.52. Analiza współczynników ABS w funkcji liczby cykli zmian ciśnienia dla wszystkich czujników FBG zainstalowanych na badanym zbiorniku.	158
Rys. 5.53. Analiza współczynników ABS w funkcji liczby cykli zmian ciśnienia dla poszczególnych czujników FBG zainstalowanych w przekrojach badanego zbiornika: A-A (a), B-B (b) oraz C-C (c).	160

Rys. 5.54. Rozmieszczenie czujników na testowym obiekcie (a) oraz widok rzeczywistego zbiornika wysokociśnieniowego z zainstalowanymi na powierzchni czujnikami światłowodowymi (b).....	161
Rys. 5.55. Referencyjny pomiar odkształceń czujnikami światłowodowymi w zakresie ciśnienia od 0 do 350 bar (a) oraz widmo odbiciowe od światłowodowych siatek Bragga (b) dla zbiornika bez zewnętrznych, programowanych defektów.....	162
Rys. 5.56. Zbiornik testowy w komorze bezpieczeństwa (a) oraz stanowisko pomiarowe do zmiany ciśnienia wewnętrznego oraz pomiarów odkształceń metodami światłowodowymi (b).....	163
Rys. 5.57. Rozmieszczenie czujników i defektów programowanych na zbiorniku testowym;.....	163
Rys. 5.58. Defekty w zbiorniku testowym: wzdłużny (a) oraz obwodowy (b).....	164
Rys. 5.59. Zmiana odkształceń obwodowych zbiornika w funkcji ciśnienia wewnętrznego, zarejestrowana przez światłowodowe siatki Bragga: FBG5 oraz FBG7 dla zbiornika bez oraz z defektem (Krok 2).	164
Rys. 5.60. Zmiana odkształceń wzdłużnych zbiornika w funkcji ciśnienia wewnętrznego, zarejestrowana przez czujniki SOFO A oraz SOFO B dla zbiornika bez oraz z defektem (Krok 3).....	165
Rys. 5.61. Zmiany sygnałów emisji akustycznej dla zbiornika z wprowadzonymi defektami programowanymi: Krok 2 (a) oraz Krok 3 (b); 1 – amplituda sygnałów akustycznych, 2 – zmiana ciśnienia w zbiorniku, 3 – sygnał RMS (wszystkie sygnały rejestrowane w funkcji czasu trwania eksperymentu).	166
Rys. 5.62. Analiza różnic odkształceń pomiędzy pomiarem referencyjnym (Krok 1) oraz pomiarami wykonanymi dla zbiornika z programowanymi defektami (Krok 2 ÷ Krok 3).	166
Rys. 6.1. Schemat procesu wyplatania tzw. preformy [142].	169
Rys. 6.2. Schemat ramy wyplatającej wraz z manipulatorem [142].	170
Rys. 6.3. Rama wyplatająca firmy HERZOG wraz z manipulatorem KUKA (a) oraz zbiornik w trakcie procesu wyplatania włókna ciągłego (b) [104].....	170
Rys. 6.4. Uzyskana struktura wplecionego kompozytu (kąt wyplotu: 54°).	171
Rys. 6.5. Schemat procesu infiltracji zbiorników wysokociśnieniowych.	171
Rys. 6.6. Stanowisko do infiltracji zbiorników (a) oraz proces przesycania (b).....	172
Rys. 6.7. Zbiorniki wysokociśnieniowe wykonane metodą wyplotu włókna ciągłego [119].	172
Rys. 6.8. Struktura materiału kompozytowego wykonanego metodą wyplotu włókna ciągłego oraz infiltracji (powiększenie x25).	173
Rys. 6.9. Struktura materiału kompozytowego wykonanego metodą wyplotu włókna ciągłego oraz infiltracji (powiększenie x50).	174

Rys. 6.10. Schemat rozmieszczenia czujników FBG oraz widok utkanej struktury z zainstalowanym czujnikiem FBG3 (a) oraz widok zbiornika w trakcie wyplatania z zainstalowanym na warstwie nr 7 czujnikami SOFO® (b) [104].	175
Rys. 6.11. Odształcenia czujników FBG zarejestrowane w trakcie wyplatania zbiornika.	176
Rys. 6.12. Widmo odbiciowe pochodzące od czujników FBG zainstalowanych w strukturze wyplatanego zbiornika przed (ozn.: before braiding process) oraz po procesie produkcji (ozn.: after braiding process).	176
Rys. 6.13. Zmiany odształceń wzdłużnych (long) i obwodowych (cross) przed oraz po procesie wyplatania zbiornika z czujnikami interferometrycznymi.	178
Rys. 6.14. Zmiana długości fali Bragga (λ_B) w trakcie procesu infiltracji zbiornika wyplatanego.	178
Rys. 6.15. Infiltracja zbiornika ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi.	179
Rys. 6.16. Komora klimatyczna do wygrzewania (utwardzania) zbiorników.	180
Rys. 6.17. Zmiana odształceń zbiornika wyplatanego oraz temperatury w komorze termicznej w trakcie procesu utwardzania.	181
Rys. 6.18. Widmo odbiciowe pochodzące od czujników FBG zarejestrowane przed wyplataniem zbiornika (ozn.: before braiding) oraz po jego wypleceniu (ozn.: after braiding), jak również po ukończeniu wszystkich procesów wytwarzania (ozn.: after all manufacturing processes).	182
Rys. 6.19. Kompozytowe zbiorniki wykonane metodą wyplotu włókna ciągłego ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi typu FBG (a) oraz SOFO® (b), w trakcie badań quasistatycznych.	183
Rys. 6.20. Wyniki badań ciśnieniowych (próba quasistatyczna) zbiornika wyplatanego z czujnikami FBG: liczba zdarzeń zarejestrowanych przez cztery czujniki emisji akustycznej (wykres górny), odształcenia zarejestrowanych przez czujniki FBG (wykres środkowy) oraz zmiana ciśnienia wewnętrznego w trakcie trwania eksperymentu (wykres dolny).	184
Rys. 6.21. Wyniki badań ciśnieniowych (próba quasistatyczna) zbiornika wyplatanego z czujnikami interferometrycznymi SOFO: liczba zdarzeń zarejestrowanych przez cztery czujniki emisji akustycznej (wykres górny), odształcenia zarejestrowanych przez czujniki SOFO (wykres środkowy) oraz zmiana ciśnienia wewnętrznego w trakcie trwania eksperymentu (wykres dolny).	185
Rys. 6.22. Zmiana odształceń zbiornika wyplatanego z czujnikami SOFO® w funkcji ciśnienia wewnętrznego.	186
Rys. 6.23. Kompozytowe zbiorniki ciśnieniowe wykonane w technologii wyplotu włókna ciągłego.	187

Rys. 7.1. Widoki aksonometryczne charakterystycznych obszarów nawojów Nr 1, 2 i 5, zaznaczonych ramkami [146] (numeracja nawojów jak w pracy cytowanej).	191
Rys. 7.2. Struktura i ćwiartka jednostkowej komórki reprezentatywnej [153].	192
Rys. 7.3. Wpływ pęknięcie pojedynczego włókna na włókna sąsiadujące [156].	193
Rys. 7.4. Automaty komórkowe modelujące włókna w kompozycie [156, 157].	194
Rys. 7.5. Symulowany wzrost defektów w próbce typu NOL, w zależności od czasu dla wybranych etapów wzrostu defektów [156].	195
Rys. 7.6. Przykładowa zmiana wymiaru fraktalnego związana ze wzrostem defektów w funkcji czasu wyrażonego w procentach [156].	195
Rys. 7.7. Przykładowe przebiegi sygnałów akustycznych dla próbki typu NOL: wynik modelowania (a) oraz wyniki pomiaru (b) [157, 158].	195

Spis tabel

Tab. 2.1. Zmiany długości fali Bragga pod wpływem czynników zewnętrznych dla czujników pracujących w różnych oknach telekomunikacyjnych [16].....	28
Tab. 2.2. Zestawienie parametrów technicznych dla wybranych rodzajów systemów bazujących na czujnikach światłowodowych.....	44
Tab. 4.1. Tabela wyników próby na rozciąganie dla próbek NOL	101
Tab. 5.1. Porównanie parametrów ekonomicznych i konstrukcyjnych zbiorników wykonanych z różnych materiałów (kompozyt węglowo-epoksydowy CFRC, szklano-epoksydowy GFRC, hybrydowy CFRC+GFRC oraz referencyjny stalowy); na podst. [127].	114
Tab. 5.2. Charakterystyka podstawowych parametrów zbiorników wysokociśnieniowych spełniających wymogi dla sprężonego gazu ziemnego CNG i wodoru w zależności od ich typu [2, 4, 129].	115
Tab. 5.3. Wartości minimalnych współczynników bezpieczeństwa oraz ciśnień niszczących w zależności od stosowanych powłok nośnych zbiorników wysokociśnieniowych dla zbiorników (CNG/wodór, NWP odpowiednio: 20 i 70 MPa), na podst. [2, 4, 129].	117
Tab. 5.4. Wybrane badania kwalifikujące dla zbiorników wysokociśnieniowych przeznaczonych do gromadzenia paliw (w nawiasach podano angielskie nazwy stosowane w literaturze przedmiotu, X – oznacza konieczność realizacji badań).....	119
Tab. 5.5. Zmiana lokalnych odkształceń zbiornika hybrydowego po wykonaniu kolejnych programowanych defektów.....	153
Tab. 6.1. Analiza wagowa próbki kompozytu wyciętej ze zbiornika wykonanego metodą wyplotu.....	174
Tab. 6.2. Zmiana długości fal Bragga oraz odkształceń zarejestrowana przez czujniki FBG po procesie wyplatania zbiornika.	177
Tab. 6.3. Zmiana długości fal Bragga oraz odkształceń zarejestrowana przez czujniki FBG po zakończonym procesie produkcji zbiornika wyplatane.....	182

Załącznik – Inne aplikacje czujników światłowodowych

Doświadczenia zdobyte w zastosowaniu systemów pomiarowych bazujących na czujnikach światłowodowych w monitorowaniu stanu technicznego wysokowyężonych zbiorników kompozytowych, przeznaczonych do gromadzenia wysoko sprężonych paliw gazowych (wodór, metan), pozwoliły na ich wykorzystania do monitoringu strukturalnego innego rodzaju konstrukcji mechanicznych. Poniżej przedstawiono krótko wybrane aplikacje, wraz z odnośnikami do szerszych opisów, we wdrożeniach których autor miał okazję uczestniczyć.

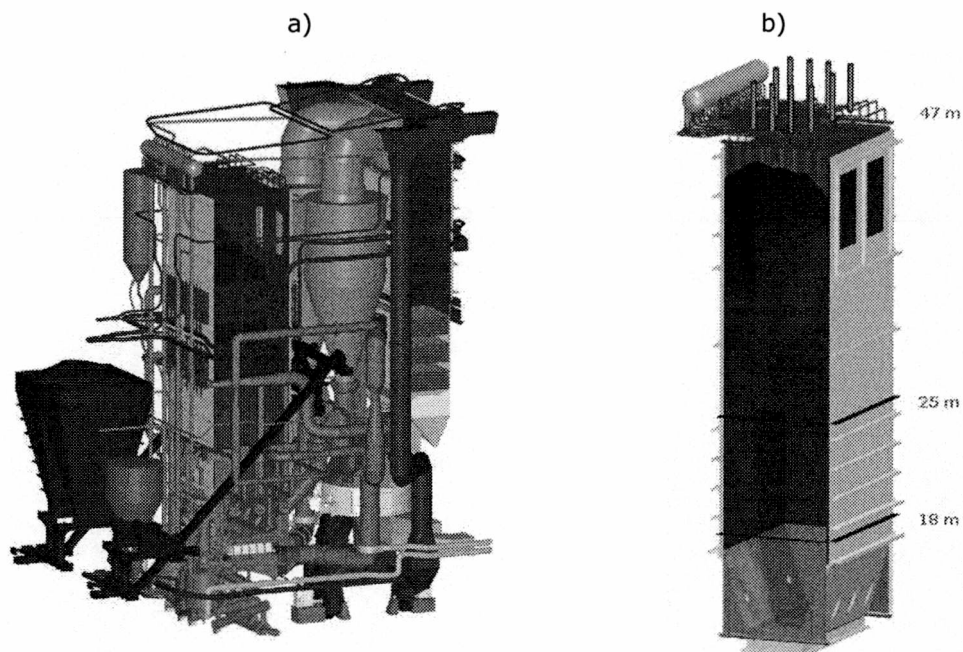
I. System SHM dla kotła energetycznego w Elektrowni Siersza

Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, wspólnie z firmą RAFAKO S.A., wykonał referencyjny projekt monitoringu strukturalnego na kotle fluidalnym typu OFz-425 w Elektrowni Siersza (Rys. Z.1).

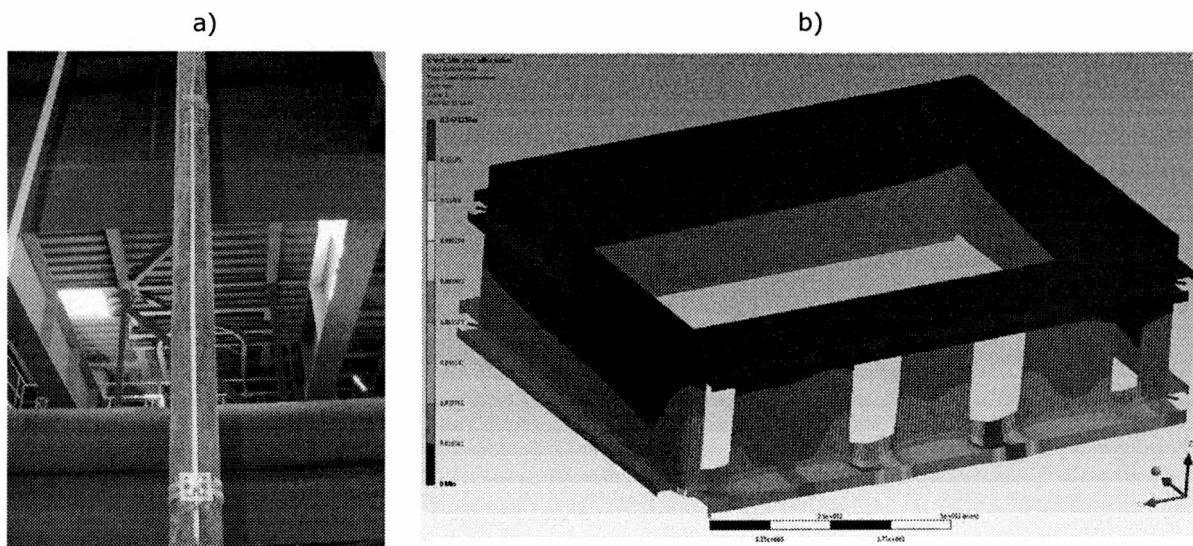
W związku z planowanym remontem, dotyczącym m.in.: wymiany części przegrzewaczy grodziowych, tylnego pasa ściany szczelnej oraz elementów stropu, zdecydowano się na monitorowanie stanu odkształcenia wybranych elementów konstrukcji kotła: cięgien oraz ścian komory paleniskowej (Rys. Z.2a). Inwestorowi, a zarazem nadzorcy prac remontowych (RAFAKO S.A.) zależało, aby na w czasie rzeczywistym, wraz z postępującymi pracami, kontrolować, czy prowadzone prace nie zagrażają bezpieczeństwu konstrukcji kotła oraz ludzi podczas remontu. Było to spowodowane głównie wycinkami ekranu, tworzącymi okna komunikacyjne na czas prowadzonych prac, osłabiającymi całkowitą wytrzymałość oraz sztywność komory paleniskowej. Zaproponowany plan prowadzonych prac remontowych nie przewidywał zagrożeń, jednakże dodatkowa wiedza pozwala na ich przyspieszenie (prowadzenie prac równolegle w kilku miejscach; świadome podejmowanie strategicznych decyzji dotyczących remontu), a zarazem pozwoliła porównać stan konstrukcji po zakończeniu remontu, do stanu wyjściowego przed rozpoczęciem prac.

W związku z tym, zaproponowano, aby w trakcie prac remontowych zastosować pomiary odkształceń i przemieszczeń z wykorzystaniem interferometrycznych czujników światłowodowych SOFO® firmy Smartec. Oparty na tej technologii system pomiarowy miał za zadanie monitorować lokalnie konstrukcję, w jej najbardziej wyężonych obszarach oraz informować o pojawiających się zagrożeniach. Miejsca instalacji czujników (np. w okolicach wykonywanych otworów) zostały wyznaczone po wspólnych uzgodnieniach stron zaangażowanych w projekt: Elektrowni Siersza, RAFAKO S.A. oraz Politechniki Wrocławskiej. Lokalizacja czujników została wsparta poprzez przygotowanie odpowiedniego modelu numerycznego konstrukcji kotła w RAFAKO S.A. (Rys. Z.2b). Ponadto uruchomiony został serwis WWW, na którym w czasie rzeczywistym obserwować można było wpływ prowadzonych prac na zachowanie się konstrukcji (Rys. Z.3).

Szczegółowe informacje dotyczące opisywanego powyżej zagadnienia przedstawiono w pracach [163, 164] oraz w zgłoszeniu patentowym [165].



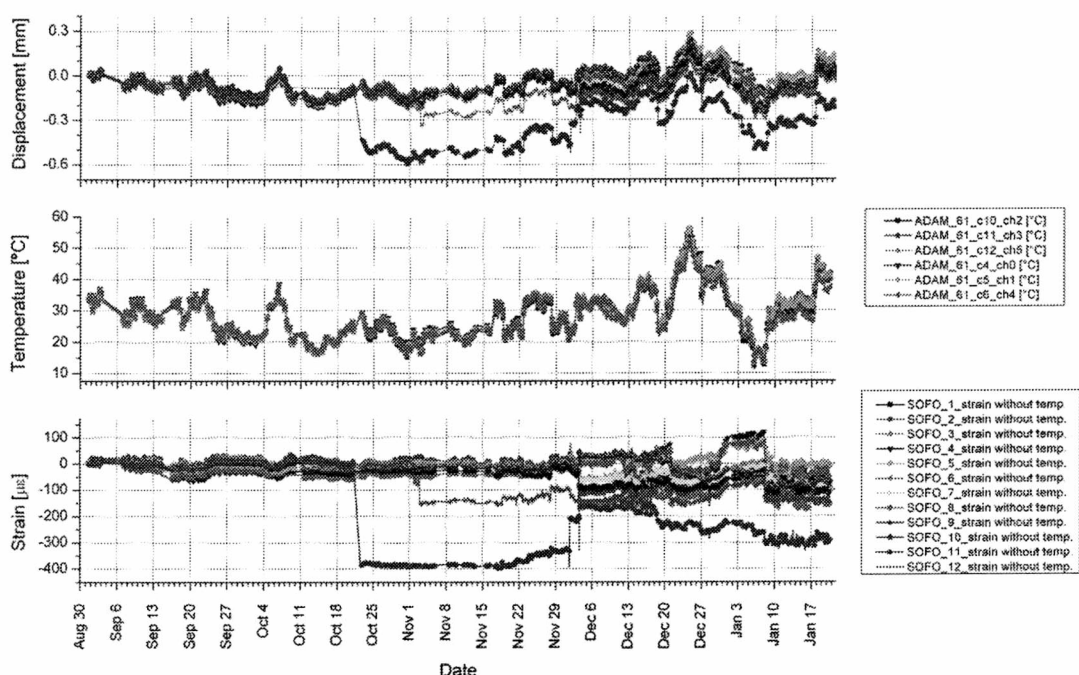
Rys. Z.1. Uproszczony schemat kompletnego kotła OFz-425 (a) oraz komory spalania (b); własność RAFAKO S.A.



Rys. Z.2. Widok czujnika typu SOFO® zainstalowanego na stalowym cięgnie (a) oraz przykładowe wyniki obliczeń - rozkład przemieszczeń sumarycznych podczas wymiany przegrzewaczy (b).

Monitorowanie stanu technicznego obiektów (SHM) energetyki konwencjonalnej przy wykorzystaniu światłowodowych systemów pomiarowych umożliwia:

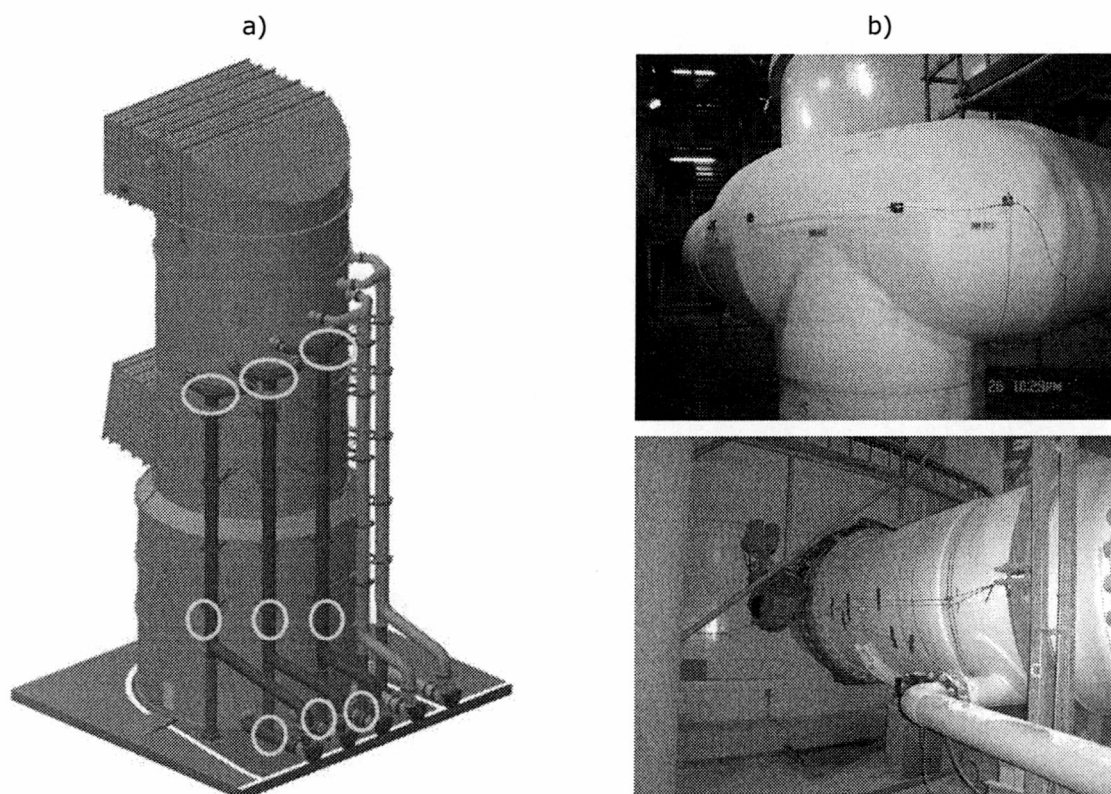
- prowadzenie pomiarów w bardzo wielu obszarach konstrukcji, które przy wykorzystaniu innych metod były niedostępne ze względów technologicznych lub ekonomicznych,
- podczas eksploatacji kontrolować zmiany zachodzące w monitorowanych elementach, a dzięki temu odpowiednio szybko reagować na ewentualne zagrożenia, dodatkowo zwiększając bezpieczeństwo obiektu oraz ludzi,
- podczas procesu remontu kotła energetycznego na świadome podejmowanie decyzji dotyczących strategii prac remontowych, co może skutkować skróceniem czasu potrzebnego do wykonania wszystkich prac,
- na zdalny dostęp do wyników oraz ich wszechstronną obróbkę, umożliwiając szybszą i pełniejszą kontrolę nad monitorowanymi obszarami.



Rys. Z.3. Wykresy przedstawiające pracę cięgien zawieszek komory kotła podczas prac remontowych: całkowite przemieszczenia, zmiany temperatury, odkształcenia bez wpływu temperatury.

II. Monitorowanie rurociągów absorbera w instalacji odsiarczania spalin w Elektrowni Bełchatów

Kolejnym zastosowaniem systemów monitoringu strukturalnego SHM w szeroko pojętej energetyce, jest ich aplikacja do monitorowania rurociągów absorbera w Instalacji Odsiarczania Spalin (IOS), będącym częścią nowo wybudowanego bloku energetycznego Elektrowni Bełchatów (Rys. Z.4). Projekt został zrealizowany wspólnie przez Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, a także firmy: RAFA-KO S.A. oraz QuantumSHM.

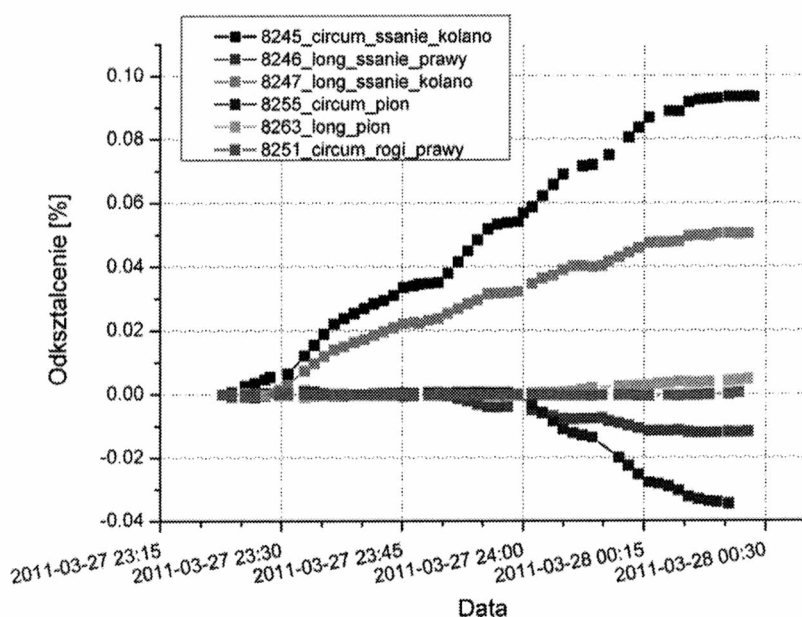


Rys. Z.4. Schemat rozmieszczenia czujników (zaznaczone okręgami) na rurociągach cyrkulacyjnych absorbera (a), a także ich widok bezpośredni na obiekcie w okolicach tzw. „baranich rogów” oraz części ssawnej (b).

Celem pomiarów była weryfikacja poprawności działania 3 rurociągów cyrkulacyjnych absorbera nr 2 IOS, wykonanych z linerów polimerowych, wzmocnionych przez nawinięty na zewnątrz kompozyt szklano-polimerowy. W tym celu zastosowane zostały pomiary odkształceń powierzchni rurociągów w wybranych obszarach, z wykorzystaniem dwóch dostępnych metod pomiarów światłowodowych (SOFO® oraz FBG), Rys. Z.5. Dodatkowo przeprowadzone zostały pomiary emisji akustycznej (EA) materiału konstrukcyjnego rurociągów, w celu określenia występowania ewentualnej postępującej degradacji materiału. Szczegółowe informacje dotyczące opisywanego powyżej zagadnienia przedstawiono w następujących pracach: [166, 167, 168].

Ogólne założenia dla systemu monitorowania rurociągów w przytoczonym przykładzie sprowadzić można do tego, by:

- kontrolować bezpieczeństwo konstrukcji oraz pracowników instalacji IOS podczas napełnia, ruchu próbnego, a także codziennej eksploatacji,
- monitorować zachowanie się krytycznych obszarów konstrukcji, w tym: łączenia elementów składowych oraz fragmenty szczególnie wyężone, np. kolanka, trójniki, itp.),
- weryfikować zgodność zachowania się konstrukcji z założeniami projektowymi,
- kontrolować proces degradacji materiału kompozytowego definiować czas bezpiecznego użytkowania,
- po przez pomiary odkształceń lokalizować: uszkodzenia w okolicach zawieszzeń, podparć, spowodowanych uderzeniami/kolizjami, błędami produkcyjnymi,
- kontrolować przepustowość i ewentualne czopowanie poprzez zmiany odkształceń i izolacyjności termicznej,

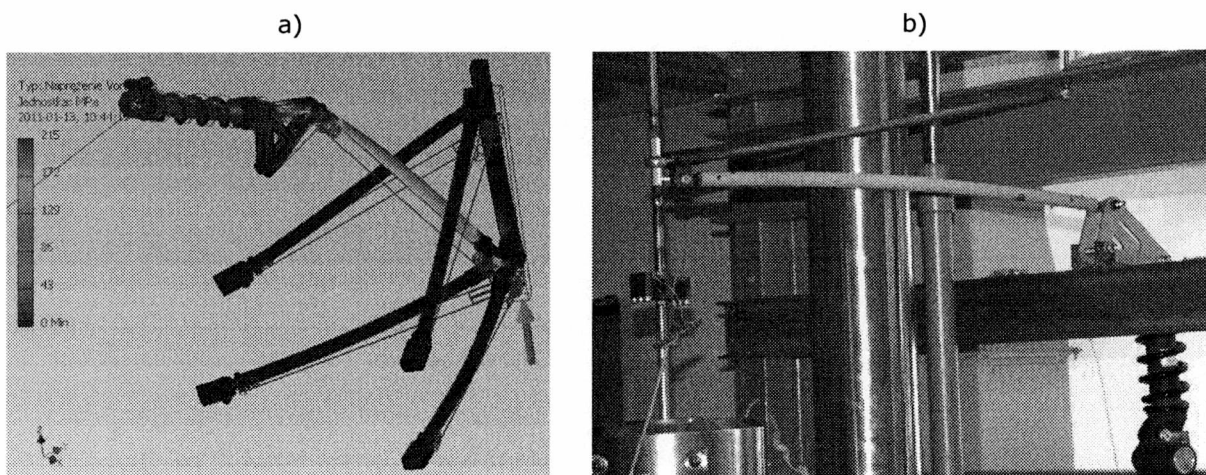


Rys. Z.5. Przykładowe charakterystyki odkształceń całkowitych rurociągu zarejestrowane przez czujniki SOFO® w trakcie próby statycznej.

III. System do monitorowania w trybie „on-line” zawieszenia samochodu typu Formuła Student

W ramach prowadzonych prac w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, opracowano koncepcję oraz zrealizowano badania laboratoryjne nowoczesnej konstrukcji zawieszenia samochodu sportowego typu Formuła Student, wykonanej z materiałów kompozytowych oraz wyposażonego w aktywny system monitoringu stanu wyężenia w trybie „on-board” (Rys. Z.6).

Wyniki uzyskane podczas przeprowadzonych badań symulujących pracę układu wahaczowego bolidu pozwoliły stwierdzić pełną przydatność zaproponowanej metody pomiarowej bazującej na punktowych czujnikach FBG. Umożliwia ona kontrolowanie pola odkształceń miejsc szczególnie wyężonych w trakcie ekstremalnych obciążeń konstrukcji, na przykład podczas wyścigów, jak również może służyć w celach optymalizacji stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

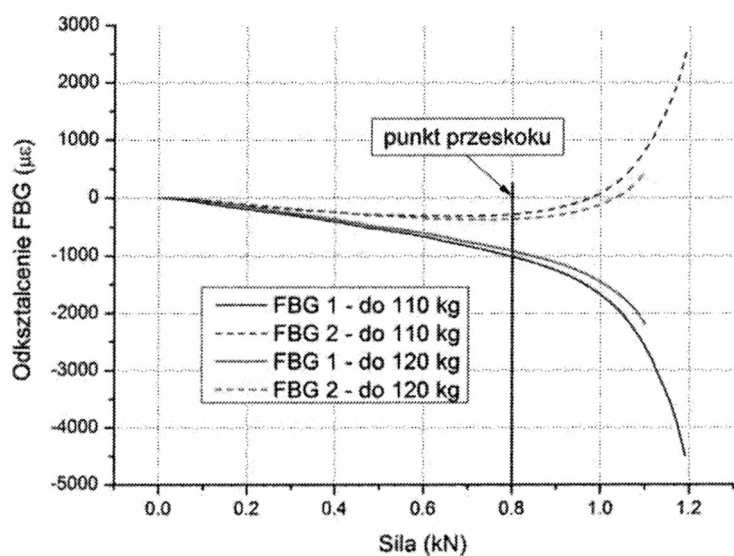


Rys. Z.6. Analiza MES modelu wyjściowego (a) oraz badania zmodyfikowanego (b) układu wahaczowego.

Zastosowanie kompozytowego profilu rurowego pozwoliło zredukować masę układu wahaczowego w porównaniu do pierwotnego rozwiązania wykorzystującego rurki stalowe o około 45 %. Jednakże w trakcie realizowanych badań nad nową konstrukcją, zaobserwowano nieregularny przebieg odkształceń zmierzonych w układzie (Rys. Z.7). Związane było to z zastosowaniem nieoptymalnego materiału (włókno szklane) oraz niewłaściwej konstrukcji samego profilu. Pomimo tego, zaproponowana metoda pomiarowa z wykorzystaniem czujników FBG, okazała się kluczowa przy analizie zaproponowanego rozwiązania z wykorzystaniem materiałów kompozytowych, a otrzymane wyniki pozwalają potwierdzić przydatność systemu w motosporcie w tzw. aplikacji „on board”. Należy podkreślić, iż zastosowanie ciągłego monitorowania elementów konstrukcyjnych samochodów sportowych umożliwia:

- ciągłą rejestrację zachowań i modyfikacja parametrów układu,
- określenie stanu degradacji materiału (prognozowanie trwałości, zwiększenie bezpieczeństwa),
- doskonalenie wiedzy, przydatnej w projektowaniu nowych konstrukcji.

Szczegółowe informacje dotyczące opisywanego powyżej zagadnienia można znaleźć w pracy [169].

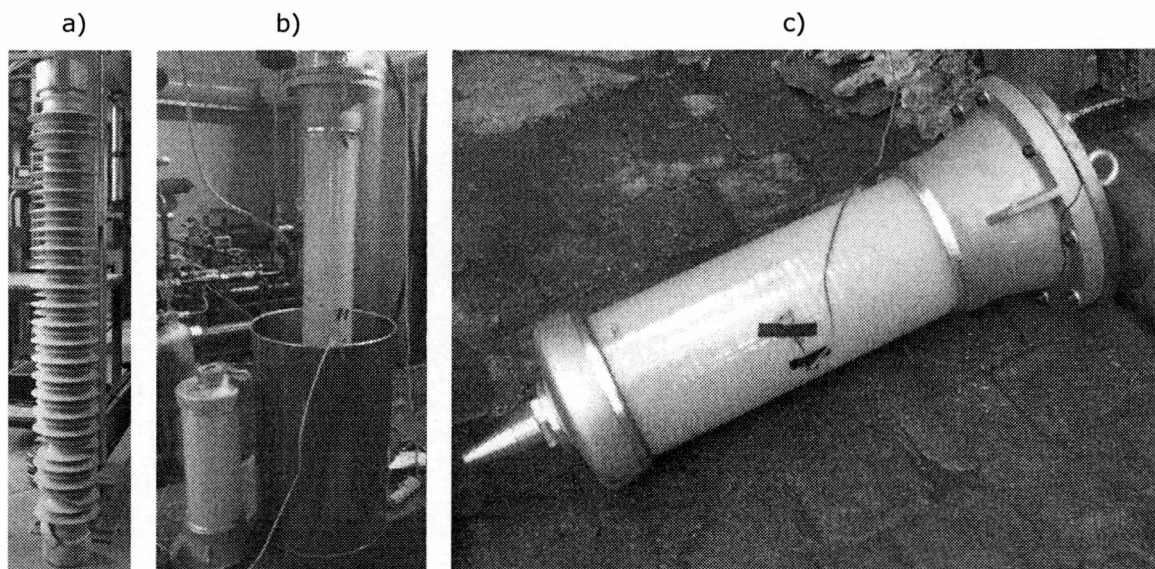


Rys. Z.7. Przebieg odkształceń kompozytowego elementu wahacza w funkcji siły (widoczny jest moment utraty stateczności kompozytowej rurki oraz jego wyboczenie).

IV. Pomiary kompozytowych izolatorów wysokonapięciowych

W ramach współpracy z Instytutem Elektrotechniki Zakład Doświadczalny III w Międzyzlesiu, liderem w produkcji wielu typów izolatorów na polskim rynku, prowadzone były prace mające na celu opracowanie nowej konstrukcji izolatora kompozytowego (Rys. Z.8), które obecnie niemal całkowicie wyparły konstrukcje porcelanowe. Najbardziej skomplikowane to kompozytowe izolatory osłonowe z rdzeniem rurowym, wykonanym metodą nawijania z kompozytowego materiału epoksydowo-szklanego (ES). Największe z produkowanych mają wysokość ok. 3m i średnice rzędu 400mm.

W celu zapewnienia wysokiej jakości izolatorów, zgodnie z istniejącymi normami należy wykonywać wiele prób i badań, które zostały podzielone na cztery grupy: badania konstruktorskie, typu, kontrolno-odbiorcze i badania wyrobu. Jednymi z najważniejszych badań od strony wytrzymałości mechanicznej izolatorów są badania na zginanie oraz obciążanie ciśnieniem wewnętrznym (Rys. Z.9). Pozwalają one m.in. na sprawdzenie prawidłowości połączenia rdzenia z okuciem oraz jakości samego rdzenia.

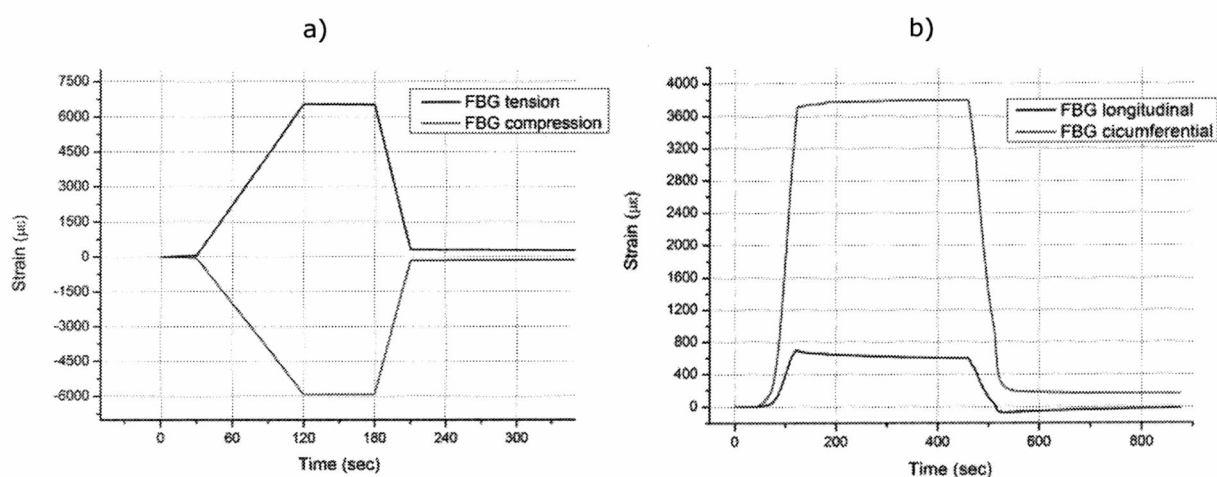


Rys. Z.8. Wysokonapięciowe izolatory kompozytowe: widok kompletnego izolatora (a) oraz jego kompozytowego rdzenia przed (b) oraz po badaniach ciśnieniowych (c).

Przeprowadzone badania miały na celu sprawdzenie jakości oraz parametrów użytkowych testowanych izolatorów, jak również określenie możliwości zastosowania nowych technik pomiarowych w zakresie badań normowych. Z punktu widzenia obciążeń ciśnieniowych konstrukcji kompozytowych, najbardziej pożądanym było by uzyskanie takich samych wartości odkształceń w obydwu mierzonych kierunkach (wzdłużnym oraz obwodowym względem osi głównej), jednakże badane obiekty muszą równocześnie spełnić wymagania od strony wytrzymałości na zginanie.

Na Rys. Z.9b można zauważyć, że w trakcie badań ciśnieniowych odkształcenia na kierunku wzdłużnym są dużo mniejsze niż odkształcenia obwodowe (ok. 5,5 razy). Wynika to z faktu, iż udział wzmocnienia na tym kierunku jest znacznie większy, co nie jest bez znaczenia w przypadku próby na zginanie (Rys. Z.9a). W trakcie próby na zginanie czujniki FBG były zainstalowane w kierunku wzdłużnym w okolicach mocowania rury do okucia, po dwóch jej stronach.

Podjęte próby potwierdziły poprawność zachowania się rdzeni pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Uzyskane wyniki świadczą o dobrym zaprojektowaniu rury, a zaproponowana struktura ułożenia wzmocnienia nie wymaga ingerencji. Szczegółowe informacje dotyczące zagadnienia monitorowania izolatorów wysokonapięciowych można znaleźć między innymi w pracy: [170].



Rys. Z.9. Lokalne odkształcenia izolatora kompozytowego w trakcie próby na zginanie w zakresie od 0 do 15 kN (a) oraz próby ciśnieniowej w zakresie od 0 do 42 barów (b).

OPTICAL FIBER BASED STRAIN MONITORING METHOD FOR HIGH PRESSURE COMPOSITE VESSELS FOR GASEOUS FUEL STORAGE

Paweł Gašior

Summary

The main purpose assumed in the work was creation of a Structural Health Monitoring system, SHM, integrated with the object for monitoring the strain condition of a high-pressure composite vessel designated for storing pressurised gas fuels (methane, hydrogen). For building the system several fibre optic sensor types were used.

It has been assumed that the system should provide for continuous and reliable monitoring of the structure during its long operation and enable estimation of degradation degree of the composite vessel load-carrying layer, and by that determination of its safe operation period. Showing suitability of the system for control of the vessels manufacturing technology and fulfilling the requirements of vessel certification standards has been considered essential. At the same time, it has been assumed that the measurement system should be suitable for testing materials (composites) applied in vessel structure. Cognitive aim of the study was identification of strain condition in extremely loaded high-pressure composite structures.

The research object was wide spectrum of commercial and prototype self-made vessels for pressurised storing of methane (CNG) and hydrogen (CH₂), with nominal working pressures correspondingly: 200 and 700 bars, and various modifications of composite material in a form of tube and ring specimens of the NOL type.

An overview of the current knowledge in the research methods using different fibre optic sensors was performed. Critical analysis of the subject literature in the field of systems for monitoring composite vessels and other objects made of composites, including those with application of strain gauges and fibre optic sensors, was also made. All this enabled formulating the own research program.

It has been assumed that reaching the work goals required application of measurement methods based at fibre optic sensors with particular consideration for the Fibre Bragg Gratings (FBG) and interferometric sensors of the SOFO® type. These converters allowed for integration with the monitored object (a possibility of building-in the measurement head into the composite material structure without influencing its mechanical properties), and they were also characterised with high measurement sensitivity, wide

measurement range, resistance to electromagnetic interference, and most of all, with intrinsic safety.

Next, the own tests at composite specimens (of the tube and NOL type) were performed with the use of fibre optic based SHM, both in the static load and the creeping test conditions. Full suitability of the proposed measurement systems in measuring strains of the order of 3%, and determining the shearing moment at phase boundary (reinforcement fibre – matrix) has been shown. The selected experimental results were compared with the results of numerical modelling. Possibility of calibrating the optical measurement system through simultaneous recording of acoustic signals emission was verified, which enabled recording of the failure accumulation process in the composite structure subjected to continuous loading.

Composite vessels were subjected to quasi-static, cyclic and impact loads according to the obligatory standards. Subjected to tests were the vessels both, newly-built and those initially subjected to programmed defecting (flaws, delamination). The bottles were manufactured with winding technology, as well as with braiding. In all cases the capacities of SHM were tested using the fibre optic sensors. An attempt of identifying the process of defects accumulation in the composite vessel through measurement of changes in the local strains was undertaken. In addition, tests were performed, which enabled comparison of fibre optic measurement systems with different lengths of measuring heads and the most advantageous solution was indicated.

With the method of long fibre braiding the prototype high-pressure vessels with the fibre optic sensors of the FBG and SOFO® type integrated with the load-carrying layer were produced. Their application directly within the manufacturing process enabled continuous analysis of the structure strain condition both, at the stage of production (braiding, infiltration, hardening), as well as during the laboratory tests.

The main problems related to numerical modelling of composite vessels have also been pointed and the selected examples of tests in that area were discussed.

In addition, examples of other laboratory applications of SHM systems based at fibre optic sensors, among others for monitoring: suspension of the sports car type Formula Student, composite high-voltage insulators, materials of giant magnetostriction (magnetorheological composites type SMART), as well as composite pultrud applied as reinforcements in steel and concrete building structures have been presented.

Examples of own research in applying the fibre optic SHM in power engineering (monitoring of suspensions and combustion chamber walls of the fluid boiler and composite pipelines of the combustion gas desulphurisation installation) have also been presented.

The results obtained within the dissertation have been collected in the form of conclusions and final remarks. Scientific achievements have been published in over fifty works

(articles in professional journals, conference papers, reports), the Author or Co-Author of which is the candidate for doctor's degree.

List of figures

Fig. 2.1. Concept of standard sensor operation with single conversion (a) and optical fibre sensor with double conversion (b) [5].

Fig. 2.2. Sensor (system) classification with regard to the size of external physical area measured (based at [13]).

Fig. 2.3. Principle of fibre Bragg grating operation [14].

Fig. 2.4. Exemplary changes in Bragg wavelength influenced by strain and temperature.

Fig. 2.5. Schematic diagram of interferometric system for a measurement system from Smartec (based at: [20]).

Fig. 2.6. Schematic diagram of Fabry – Perot optical fibre interferometer system (based at [12, 14]).

Fig. 2.7. Concept of the point micro-bending sensor with v-grooves (based at [26]).

Fig. 2.8. Build of micro- bending head (based at [23]).

Fig. 2.9. Change in optical power propagated in the measurement system with micro-bending sensor as a function of the sensor strain [32].

Fig. 2.10. Light scattering in the optical fiber (based at [10]).

Fig. 2.11. Raman scattering: anti-Stokes wave intensity change under the influence of ambient temperature change (based at [10]).

Fig. 2.12. Dependence of stimulated Brillouin scattering change under the influence of temperature (a) and strains (b) (based at [37]).

Fig. 2.13. Exemplary relationship of Brillouin frequency change under the influence of local change in optical fiber temperature, before (a) and after its heating up (b) [38].

Fig. 2.14. Sensor installation topologies in the SHM systems: simple (a), parallel (b) and cross shaped (c); concept of SMARTEC company, (based at [10]).

Fig. 2.15. Concept of the SHM system for northern Młyński bridge in Wrocław [own elaboration].

Fig. 2.16. Schematic arrangement of sensors within the gravity dam in a cross-section (concept of SMARTEC company, based at [56]).

Fig. 2.17. Concept of dikes monitoring using the distributed sensors (concept of SMARTEC company, based at [56]).

Fig. 2.18. Concept of distributed optical fibre sensor installation for pipeline monitoring.

Fig. 3.1. Exemplary localisation of optical fibre sensor (OFS) between subsequent layers of composite laminate [03/903/OFS/903/03] (based at [81]).

Fig. 3.2. Composite material braiding with the optical fibre sensor integrated (based at [87]).

Fig. 3.3. Diagram of local defects formation in composite laminates with integrated optical fibre sensors (based at [9]).

Fig. 3.4. View of carbon-epoxy composite with a built-in optical fiber: in parallel (a) and perpendicularly (b) to the reinforcement fibres (based at [91]).

Fig. 3.5. Shift in reflection spectrum coming from FBG sensors in the course of manufacturing composite-aluminium laminates with several layers arranged at different angles in relation to each other (a) and the one-direction laminate (b) (based at [82]).

Fig. 3.6. Test beams with composite reinforcements (a), manufactured with laboratory method (1) and by the Polskie Mosty Company (2), as well as characteristics (b) obtained with the use of micro-bending sensor and FBG for a beam with commercial composite reinforcement [93].

Fig. 3.7. The test of 4-point bending of steel beam reinforced with one-direction carbon-epoxy composite with integrated optical fibre sensors FBG (a) and comparison of the results obtained for different reinforcements (b) [94].

Fig. 3.8. Geometrical model with marked defects (a) and numerical FEM (b) of the composite pressure partition used in calculations of strain field distribution for a load appearing in flight (based at [97]).

Fig. 3.9. Result of numerical calculations of strain field distribution for pressure partition with loosened reinforcement (a) and the partition after local impact (b) (based at [97]).

Fig. 3.10. Arrangement of FBG sensors for detecting defects at composite pressure partition (based at [97]).

Fig. 3.11. Passive cabling for strain gauges (a) and optical fibre sensors – marked with a circle (b) (based at [101]).

Fig. 3.12. Manufacturing of composite vessel with winding method with FBG sensors built-in the load carrying structure (based at [106]).

Fig. 3.13. Exemplary results of Bragg wavelength shifts influenced by internal pressure changes in the vessel as a function of experiment duration for static (a) and cyclic test (b) (based at [106]).

Fig. 3.14. View of composite pressure vessel with FBG sensors integrated during winding process (a) and its numerical model (b) (based at [8]).

Fig. 3.15. Composite vessel strains recorded by FBG and strain gauges as a function of internal pressure during quasi-static pressure test (a) and strain distribution in the vessel at internal pressure of 500 psi ($\sim 34,5$ bar) recorded by the sensors and determined from numerical calculations for the assumed model (b) (based at [8]).

Fig. 3.16. View of composite vessels type 4, with SOFO® optical fibre sensors installed, designated for storing CNG (a) and diagram of sensors arrangement at the test vessel (b) (based at [110]).

Fig. 3.17. Test results for experimental CNG vessels with optical fibre sensors type SOFO® installed.

Fig. 3.18. Composite specimen containing powdered Terfenol-D with optical fibre sensor installed (a) and change in longitudinal magnetostriction under the influence of magnetic field applied for different specimen types: composite and solid, recorded by FBG sensor (b) (based at [114, 115]).

Fig. 3.19. Schematic diagram of the SmartPipe® pipeline building [117].

Fig. 3.20. Distributed SMARTprofile® type optical fibre sensor integrated with the structure (a) and the process of composite pipeline braiding (b) [118].

Fig. 4.1. Geometry of a composite pipe specimen [5], detailed view of a specimen with FBG sensors glued on and view of a test setup (1 – specimen, 2 – FBG signal processing unit, 3 – testing machine).

Fig. 4.2. Circumferential strain change and displacement of testing machine piston as a function of force applied to specimens with geometry of 30° (a), 45° (b) and 60° (c).

Fig. 4.3. Reflection spectrum coming from three FBG sensors installed at the tested specimen of 30° (peaks shift after the tests which testify for permanent specimen defect are visible), as well as view of the tested specimen at the time of its destruction (matrix whitening visible).

Fig. 4.4. Specification of average strain values for three composite specimen types: 30°, 45° and 60° as a function of load.

Fig. 4.5. Comparative analysis of circumferential strains for a specimen with 30° structure.

Fig. 4.6. Composite tube specimen ready for tests (a) and its numerical model (b).

Fig. 4.7. Numerical simulations of composite tube specimen with integrated amplitude optical fibre sensor.

Fig. 4.8. Graph of strain as a function pressure for different types of sensors and numerical simulation of the tested composite specimen.

Fig. 4.9. A stand for defects simulation in a composite pipe (a) and its diagram (b).

Fig. 4.10. Optical fibre sensor arrangement at external surface of tube specimen.

Fig. 4.11. Parallel measurements of strains using FGB4 and FGB3 in different object locations (a) and change in optical power (recorded by micro-bending optical fibre head) and Bragg wavelengths (recorded by FBG4) as a function of pressure change (b).

Fig. 4.12. View of object geometry and individual materials layout; steel and composite layer (a), example of fibre arrangement (b).

Fig. 4.13. Distribution of strains in circumferential direction at quasi-punctual load – theoretical considerations (a) and comparison of the test composite layer strains determined experimentally as a result of modelling (b).

Fig. 4.14. View of a composite specimen type NOL winded at a test grips.

Fig. 4.15. View of a stand for NOL type specimen testing and of a specimen fixed in grips.

Fig. 4.16. Increase in force as a function of the experiment duration (1.75 N/s).

Fig. 4.17. Increase in force as a function of the experiment duration (17.5 N/s).

Fig. 4.18. Increase in force as a function of the experiment duration (175 N/s).

Fig. 4.19. Change in testing machine piston displacement as a result of tensile force applied for a load changing with 175 N/s rate.

Fig. 4.20. The moment of separating the last band of composite reinforcement (a) and of disruption (b) of the test NOL specimen.

Fig. 4.21. Localisation of FBG sensors and acoustic emission (EA) at the NOL type specimen.

Fig. 4.22. Quasi static tests of the NOL type specimen at load change with constant rate of 1,75 kN/s as a function of time.

Fig. 4.23. Quasi static tests of the NOL type specimen at load change with constant rate of 1,75 kN/s at a selected time period.

Fig. 4.24. Creep test of the NOL type specimen for 50 hours.

Fig. 4.25. Creep test of the NOL type specimen in the selected period of time (creeping only).

Fig. 4.26. Creep test of the NOL type specimen for 100 hours.

Fig. 4.27. Creep test of the NOL type specimen for 100 hours (selected period).

Fig. 4.28 Creep test of the NOL type specimen for 100 hours (selected period, logarithmic scale).

Fig. 5.1. Schematic diagram of a high-pressure composite vessel build of the type 3 or 4 [130].

Fig. 5.2. Examples of high-pressure vessels for storing CNG and CH₂: type 2 (a) and type 4 (b, c, d).

Fig. 5.3. Various structure types of high-pressure vessels for gas fuels storage (* - typical weight of the vessel at 1 litre of its volume for vessels of nominal work pressure 20 MPa)

Fig. 5.4. Exemplary hybrid vessel from Xperion [131, 132].

Fig. 5.5. Hydraulic stand for cyclic tests of high-pressure vessels in the Institute of Materials Science and Applied Mechanics at Wrocław University of Technology before (a) and after expansion (b) with additional multipliers increasing the maximum pressure range from 450 to 1400 bars.

Fig. 5.6. Characteristic of liquid pressure and temperature changes during cyclic tests within the range of 20-875 bar (a) and a view of the vessel installed in the safety chamber (b).

Fig. 5.7. A stand for destructive tests in the Institute of Materials Science and Applied Mechanics at Wrocław University of Technology (a) and exemplary vessels after tests (b).

Fig. 5.8. Pressure change in the course of destructive tests (destructive pressure 1428 bar) [140].

Fig. 5.9. Concept of a monitoring system for high pressure vessel.

Fig. 5.10. Sensor arrangement at the tested pressurised vessel of type 3 [128].

Fig. 5.11. Vessel strains and temperature change in the course of cyclic loads, within the pressure range 20÷300 bars (a) and 20÷500 bars (b).

Fig. 5.12. Change in Bragg wavelength recorded by FBG1 sensor, for various internal pressure values.

Fig. 5.13. Characteristic of circumferential strains measured by optical fibre Bragg gratings in various vessel locations: general view (a) and the detailed one for a selected cycle (b).

Fig. 5.14. Change in maximum circumferential strains (for $P = 875$ bars) as a function of cycle number of the test vessel loads (along with magnification of marked areas).

Fig. 5.15. Local circumferential strains in a vessel recorded by FBG sensors (upper diagram) and the strain gauges (central diagram), as well as acoustic emission signal (lower diagram) at the instant of damage [143].

Fig. 5.16. Analysis of obtained measurement results for the last cycles of the vessel loading (detection of defects in the high-pressure vessel structure).

Fig. 5.17. Damages to the type 3 vessel after a series of cyclic tests performed.

Fig. 5.18. Fatigue crack in the steel liner of the damaged vessel type 3, after a series of cyclic tests performed.

Fig. 5.19. Sensor arrangement at pressurised vessel subjected to destructive test (a) and view of the vessel in safety chamber before the tests (b).

Fig. 5.20. Change in pressure and local strains in the vessel type 4 in the course of destructive tests ($P_{\max} = 1428$ bars).

Fig. 5.21. Change in volume of liquid pumped to the vessel during destructive test as a function of internal pressure ($P_{\max} = 1428$ bars).

Fig. 5.22. View of the vessel after destructive tests.

Fig. 5.23. Composite vessels with programmed defects in the form of cuts.

Fig. 5.24. Drop test for composite vessels.

Fig. 5.25. Composite vessel of type 4 after drop test with marked locations of defect in the composite layer.

Fig. 5.26. Arrangement of twelve optical fibre Bragg gratings (FBG) at the test vessel (a) and reflection spectrum of the installed sensors (b).

Fig. 5.27. Test vessel with the programmed defects in a form of cuts and the optical fibre FBG sensors installed.

Fig. 5.28. Local strains in the test vessel measured during the „step-by-step” static pressure test.

Fig. 5.29. Local circumferential strains in the test vessel as a function of internal pressure.

Fig. 5.30. Arrangement of programmed defects and sensors at the test vessel.

Fig. 5.31. Local strains in the vessel without defect and with a programmed defect, measured in the A-A cross-section containing the shorter cut.

Fig. 5.32. Local strains in the vessel without defect and with a programmed defect, measured in the B-B cross-section containing none of the cuts.

Fig. 5.33. Local strains in the vessel without defect and with a programmed defect, measured in the C-C cross-section containing the longer cut.

Fig. 5.34. Analysis of strain differences between the reference measurement and measurements performed for the vessel with programmed defects.

Fig. 5.35. Arrangement of sensors at defected test vessel.

Fig. 5.36. Local strains of the defected vessel within the pressure range of 0 to 100 bars.

Fig. 5.37. Local strains of the defected vessel within the pressure range of 0 to 100 bars measured as a function of time during the „step-by-step” test (a) and a function of pressure (b).

Fig. 5.38. Arrangement of FBG sensors and of programmed defects at the test vessel.

Fig. 5.39. Local strains in defected vessels measured by eleven FBG type sensors, within the pressure range of 0 to 150 bars as a function of time in the „step-by-step” test (a) and as a function of pressure (b).

Fig. 5.40. Local strains in defected vessels measured within the area of big cut at pressure change from 0 to 150 bars.

Fig. 5.41. Local strains in defected vessels measured within the area of small cut at pressure change from 0 to 150 bars.

Fig. 5.42. Arrangement of FBG sensors and defects (cut and delamination) at the hybrid composite vessel.

Fig. 5.43. Vessel strains recorded during „step-by-step” test within the pressure range of 0 to 140 bars.

Fig. 5.44. Local strains in the hybrid vessel as function of internal pressure.

Fig. 5.45. Change in reflection spectrum in FBG sensors installed at hybrid composite vessel during quasi-static test.

Fig. 5.46. Local strains in the hybrid composite vessel, recorded by FBG1÷FBG6 sensors as a function of internal pressure, for the subsequent programmed defects.

Fig. 5.47. View of the programmed defect in a form of delamination at surface of the test hybrid vessel.

Fig. 5.48. Analysis of measurement results for local strains in hybrid vessel at various stages of its composite structure defecting (detection of defects in the high-pressure vessel).

Fig. 5.49. Values of local strains in defected vessel measured by fibre Bragg gratings in the A-A cross-section (a) for the pressure of 20 bars (min) and 258,5 bars (max), as well as

the amplitude of locally measured strains (b) as a function of number of the cyclic vessel loads within the range of 20 – 258,5 bars.

Fig. 5.50. Values of local strains in defected vessel measured by fibre Bragg gratings in the B-B cross-section (a) for the pressure of 20 bars (min) and 258,5 bars (max), as well as the amplitude of locally measured strains (b) as a function of number of the cyclic vessel loads within the range of 20 – 258,5 bars.

Fig. 5.51. Values of local strains in defected vessel measured by fibre Bragg gratings in the C-C cross-section (a) for the pressure of 20 bars (min) and 258,5 bars (max), as well as the amplitude of locally measured strains (b) as a function of number of the cyclic vessel loads within the range of 20 – 258,5 bars.

Fig. 5.52. Analysis of ABS coefficients as a function of the number of pressure change cycles for all FBG sensors installed at the tested vessel.

Fig. 5.53. Analysis of ABS coefficients as a function of the number of pressure change cycles for individual FBG sensors installed in the tested vessel cross-sections: A-A (a), B-B (b) and C-C (c).

Fig. 5.54. Arrangement of sensors at a tested object (a) and view of the real high-pressure vessel with optical fibre sensors installed at its surface (b).

Fig. 5.55. Reference measurement of strains with optical fibre sensors within the pressure range of 0 to 350 bars (a) and reflection spectrum from fibre Bragg gratings (b) for the vessel without external programmed defects.

Fig. 5.56. Test vessel in safety chamber (a) and measuring stand for internal pressure change and strain measurements with optical fibre methods (b).

Fig. 5.57. Arrangement of sensors and programmed defects at the test vessel.

Fig. 5.58. Defects in the test vessel: longitudinal (a) and circumferential (b).

Fig. 5.59. Change in circumferential strains of vessel as a function of internal pressure as recorded by fibre Bragg gratings: FBG5 and FBG7 for the vessel without and with a defect (Step 2).

Fig. 5.60. Change in longitudinal strains of vessel as a function of internal pressure as recorded by SOFO A and SOFO B sensors for the vessel without and with a defect (Step 3).

Fig. 5.61. Acoustic emission signal changes for the vessel with programmed defects introduced: Step 2 (a) and Step 3 (b); 1 – amplitude of acoustic signals, 2 – pressure change in the vessel, 3 – RMS signal (all signals recorded as a function of the experiment duration time).

Fig. 5.62. Analysis of strain differences between the reference measurement (Step 1) and measurements performed for the vessel with programmed defects (Step 2 ÷ Step 3).

Fig. 6.1. Schematic diagram of braiding the so called preform [144].

Fig. 6.2. Schematic diagram of braiding frame with manipulator [144].

Fig. 6.3. Braiding frame from HERZOG with manipulator from KUKA (a) and a vessel in the course of continuous fibre braiding process (b) [108].

Fig. 6.4. Structure of braided composite (braiding angle: 54°).

Fig. 6.5. Schematic diagram of high-pressure vessel infiltration process.

Fig. 6.6. Stand for vessel infiltration (a) and the impregnation process (b).

Fig. 6.7. High-pressure vessels made with the method of continuous fibre braiding [123].

Fig. 6.8. Structure of composite material manufactured with the method of continuous fibre braiding and infiltration (magnification $\times 25$).

Fig. 6.9. Structure of composite material manufactured with the method of continuous fibre braiding and infiltration (magnification $\times 50$).

Fig. 6.10. Schematic diagram of FBG sensors arrangement and view of the structure with FBG3 sensor installed (a) and view of a vessel in course of braiding with the SOFO® sensors installed at layer No. 7 (b) [108].

Fig. 6.11. Strains in FBG sensors recorded during vessel braiding.

Fig. 6.12. Reflection spectrum coming from FBG sensors installed in the structure of braided vessel before and after the production process.

Fig. 6.13. Longitudinal (long) and circumferential (cross) strain changes before and after the process of vessel braiding with interferometric sensors. 1

Fig. 6.14. Change in Bragg wavelength (λ_B) during infiltration process of a braided vessel.

Fig. 6.15. Infiltration of a vessel with optical fibre sensors integrated.

Fig. 6.16. Climatic chamber for vessels heating up (hardening).

Fig. 6.17. Strain change in braided vessel and temperatures in the thermal chamber during hardening process.

Fig. 6.18. Reflection spectrum coming from FBG sensors recorded before and after the vessel braiding, as well as after completing all manufacturing processes (described accordingly).

Fig. 6.19. Composite vessels manufactured with the continuous fibre braiding method with integrated optical fibre sensors of the FBG type (a) and of the SOFO® type (b), in course of the quasi-static tests.

Fig. 6.20. Results of pressure tests (quasi-static test) of braided vessel with FBG sensors: a number of events recorded by four sensors of acoustic emission (upper diagram), of strain recorded by FBG sensors (central diagram) and change in internal pressure during the experiment (lower diagram).

Fig. 6.21. Results of pressure tests (quasi-static test) of braided vessel with SOFO interferometric sensors: a number of events recorded by four sensors of acoustic emission (upper diagram), of strain recorded by SOFO sensors (central diagram) and change in the internal pressure during the experiment (lower diagram).

Fig. 6.22. Change in strains of the vessel braided with SOFO® sensors as a function of internal pressure.

Fig. 6.23. Pressure composite vessels manufactured in the continuous fibre braiding technology.

Fig. 7.1. Axonometric views of characteristic wound areas No. 1, 2 and 5, marked with frames [148] (wounds numbering as in the cited work).

Fig. 7.2. Structure and a quarter of the unit representative cell [155].

Fig. 7.3. Influence of single fibre crack on adjacent fibres [158].

Fig. 7.4. Cellular automata for modelling of fibres in a composite [158, 159].

Fig. 7.5. Simulated increase of defects in the NOL type specimen depending on the time for selected stages of defects growing [156].

Fig. 7.6. Exemplary change in fractal dimension related to increase in defects as a function of time expressed in percents [158].

Fig. 7.7. Exemplary acoustic signal waves for the NOL type specimen: result of modelling (a) and measurement results (b) [159, 160].

List of tables

Tab. 2.1. Changes in Bragg wavelength influenced by external factors for sensors operating in different telecommunication windows [16].

Tab. 2.2. Specification of parameters for selected types of systems based at optical fibre sensors.

Tab. 4.1. Table of results for the NOL specimens tensile tests.

Tab. 5.1. Comparison of economic and constructional parameters for vessels manufactured of various materials (carbon-epoxy composite CFRC, glass-epoxy GFRC, hybrid CFRC+GFRC, as well as the reference steel one); based at [127].

Tab. 5.2. Characteristic of basic parameters for high-pressure vessels conforming to the requirements for compressed natural gas CNG and hydrogen, depending on their type [2, 4, 133].

Tab. 5.3. Minimum values of safety factors and destructive pressures depending on the coatings applied to high-pressure carrier vessels (CNG/hydrogen, NWP correspondingly: 20 and 70 MPa), based at [2, 4, 129].

Tab. 5.4. Selected qualifying tests for high-pressure vessels designated for storing fuels (in parenthesis the English names used in the subject literature, X – indicates the necessity for further research).

Tab. 5.5. Change in local strains of hybrid vessel on introducing subsequent programmed defects.

Tab. 6.1. Gravimetric analysis of the composite specimen cut from a vessel manufactured with the braiding method.

Tab. 6.2. Change in Bragg wavelength and in strains recorded by FBG sensors after the vessel braiding process.

Tab. 6.3. Change in Bragg wavelength and in strains recorded by FBG sensors after the completed braided vessel production process.

METHODE ZUR ÜBERWACHUNG DER HOCHDRUCK-KOMPOSITBEHÄLTER FÜR GASBRENNSTOFFE UNTER NUTZUNG VON VERFORMUNGSMESSUNGEN MITTELS FASEROPTISCHER SENSOREN

Paweł Gašior

Kurzfassung

Das in der Dissertation angenommene grundlegende Ziel war die Schaffung eines - mit dem Objekt integrierten - Systems der Überwachung (engl. : Structural Health Monitoring – SHM) des Verformungszustandes eines Hochdruck-Kompositbehälters, vorgesehen für die Speicherung von komprimierten gasförmigen Brennstoffen (Methan, Wasserstoff). Für die Aufstellung des Systems wurden mehrere Typen von faseroptischen Sensoren gebraucht.

Es wurde vorausgesetzt, dass das System ein kontinuierliches und zuverlässiges Monitoring der Konstruktion während ihres langjährigen Betriebes zu sichern sowie eine Abschätzung der Degradationsstufe der Verbundwerkstoff-Tragschale des Behälters zu ermöglichen und dadurch die Zeit eines gefahrlosen Betriebes zu bestimmen hat. Für wichtig wurde auch der Nachweis der Verwendbarkeit des Systems zur Kontrolle der Herstellungstechnik von Behältern sowie die Erfüllung von Anforderungen anerkannt, die in den Zertifizierungsnormen für Behälter enthalten sind. Gleichzeitig wurde angenommen, dass das Messsystem bei den Prüfungen der Werkstoffe (Verbundwerkstoffe), die im Behälterbau verwendet werden, nutzbar sein sollte. Erkenntnisziel der Arbeit war die Identifizierung des Verformungszustandes von extrem beanspruchten Hochdruck-Kompositbehältern.

Als Prüfobjekt diente ein breites Spektrum von kommerziellen und selbst erzeugten Prototypbehältern für die Speicherung unter Druck von Methan (CNG) und Wasserstoff (CH₂), mit Nennbetriebsdruck entsprechend von: 200 und 700 bar sowie verschiedene Kompositarten in Form von rohr- und zylinderförmigen Probekörpern des Typs NOL.

Überprüft wurde der Wissenstand aus dem Bereich der Prüfverfahren unter Nutzung von verschiedenen faseroptischen Sensoren. Es wurde auch eine kritische Analyse der Fachliteratur auf dem Gebiet der Monitoringsysteme für Kompositflaschen sowie für andere Objekte aus Verbundwerkstoffen durchgeführt, darunter unter Anwendung von tensometrischen und faseroptischen Sensoren. Dadurch wurde es möglich, ein Programm für eigene Prüfungen zu formulieren.

Es wurde angenommen, dass das Erreichen der Ziele der Dissertation die Anwendung von Messverfahren bedurfte, die sich auf faseroptischen Sensoren stützten, mit besonde-

rer Berücksichtigung der FBG-Sensoren sowie der Interferometer-Sensoren SOFO®. Diese Umsetzer ermöglichten eine Integration mit dem überwachten Objekt (die Möglichkeit, einen Messkopf in die Verbundwerkstoffstruktur einzubauen, ohne ihre mechanischen Eigenschaften zu beeinträchtigen). Außerdem kennzeichneten sie sich durch eine hohe Messempfindlichkeit bei einem gleichzeitig breiten Messbereich, durch Festigkeit gegen elektromagnetische Störungen und vor allem durch Funksicherheit.

Danach wurden eigene Prüfungen an Verbundwerkstoff-Probekörpern (an rohrförmigen und an NOL-Probekörpern) unter Anwendung des faseroptischen Überwachungssystems SHM durchgeführt, sowohl unter den statischen Beanspruchungen wie auch in Kriechversuchen. Eine volle Brauchbarkeit der vorgeschlagenen Messsysteme bei den Verformungsmessungen mit den Werten der Größenordnung von 3%, sowie der Ermittlung des Schubmomentes an der Phasengrenze (Verfestigungsfaser – Matrix) wurde nachgewiesen. Die gewählten experimentellen Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen der numerischen Modellierung verglichen. Geprüft wurde die Möglichkeit, das optische Messsystem durch eine gleichzeitige Erfassung der Signale der Schallemission zu kalibrieren, wodurch es möglich wurde, den Kumulationsprozess der Beschädigung der Verbundwerkstoffstruktur, die einer kontinuierlichen Belastung ausgesetzt wurde, aufzuzeichnen.

Die Kompositbehälter wurden quasistatischen, zyklischen und Stoßbelastungen laut den geltenden Normen ausgesetzt. Geprüft wurden sowohl neu erzeugte Behälter, wie auch diejenigen, die am Eingang vorprogrammierten Beschädigungen ausgesetzt wurden (Schnitte, Aufblättern). Die Flaschen wurden nach der Wicklungs- (engl.: winding) sowie der Flechttechnik (engl.: braiding) erzeugt. In allen Fällen wurden die Möglichkeiten des SHM unter Anwendung der faseroptischen Sensoren getestet. Es wurde ein Versuch der Identifikation des Kumulationsprozesses von Beschädigungen eines Komposit-Behälters durch Messung der örtlichen Verformungsänderungen vorgenommen. Zusätzlich wurden Prüfungen durchgeführt, die es ermöglichten, die faseroptischen Messsysteme mit unterschiedlichen Längen der Messkopfstücke miteinander zu vergleichen und die günstigsten Lösungen genannt.

Durch Flechten einer langen Faser wurden Prototypochdruckbehälter mit in die Tragsstruktur integrierten faseroptischen Sensoren FBG und SOFO® erzeugt. Ihre Anwendung unmittelbar während des Herstellungsprozesses erlaubte eine fortdauernde Analyse des Verformungszustandes der Konstruktion, sowohl auf der Herstellungsetappe (Flechten, Infiltration, Verfestigung), wie auch im Laufe der Laboruntersuchungen.

Es wurde auch auf grundlegende Probleme, die mit dem numerischen Modellieren der Komposit-Behälter zusammenhängen, hingewiesen und die gewählten Beispiele der Untersuchungen in diesem Bereich behandelt.

Zusätzlich wurden Beispiele anderer Laboranwendungen der SHM-Systeme dargestellt, die sich auf faseroptische Sensoren stützen, u.a. für die Zwecke des Monitoring: der Federung eines Sportwagens des Typs Formula Student, der Verbundwerkstoff-Hochspannungsisolatoren, der Werkstoffe mit gigantischer Magnetostriktion (magnetorheologischer Verbundwerkstoff SMART) sowie der Pultrusionsprofile aus Faserverbund, die als Verstärkung in Baukonstruktionen aus Stahl und Beton verwendet werden.

Dargestellt wurden auch Beispiele eigener Untersuchungen auf dem Gebiet der Anwendung des faseroptischen SHM im Bereich der Wärmeenergietechnik (Monitoring der Aufhängungen und der Wände des Ofenraums) eines zirkulierenden Wirbelschichtkessels sowie der Verbundrohrleitungen der Entschwefelungsanlage.

Die in der Dissertation erzielten Ergebnisse wurden in Form von Schlussfolgerungen und -bemerkungen zusammengefasst. Das wissenschaftliche Werk wurde in mehr als fünfzig Arbeiten (Fachzeitschriften, Tagungsmaterialien, Berichte) veröffentlicht, deren Verfasser bzw. Mitverfasser der Doktorand ist.

МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СЖАТОГО ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Paweł Gašior

Резюме

Основной целью, принятой в диссертации, было создание интегрированной с объектом системы мониторинга (англ: Structural Health Monitoring – SHM) состояния деформации композитных резервуаров высокого давления, предназначенных для сбора сжатого газообразного топлива (метан, водород). Для построения системы было использовано несколько типов волоконно-оптических датчиков.

Предположено, что система должна обеспечить непрерывный и надежный контроль конструкции во время ее долголетней эксплуатации и позволить оценить степень деградации несущего композитного слоя резервуара и таким образом определить время безопасной эксплуатации. Большое значение имеет также демонстрация пригодности системы для контроля технологического процесса производства резервуаров и выполнение требований содержащихся в стандартах сертификации производства резервуаров. Параллельно с этим принято, что система измерения должна быть пригодна для изучения материалов (композитов), используемых в продукции резервуаров. Когнитивной целью данной работы было выявление состояния деформации композитных конструкций под чрезвычайно высокой нагрузкой.

Предметом исследования был широкий спектр коммерческих и прототипных, самостоятельно изготовленных ёмкостей для сбора метана (англ: Compressed Natural Gas – CNG) и водорода (англ: Compressed Hydrogen – CH₂), с номинальным рабочим давлением 200 и 700 баров и различных типов композитных образцов в виде трубок и колец типа NOL (англ: Naval Ordnance Laboratory – NOL).

Произведен обзор уровня знаний в области методов исследования с применением различных волоконно-оптических датчиков. Проведен также критический анализ литературы, касающейся систем мониторинга композитных баллонов и других изделий из композиционных материалов, в том числе с использованием тензодатчиков и волоконно-оптических датчиков. Это позволило разработать программу собственных исследований.

Для достижения целей диссертации потребовалось применить измерительные методы на волоконно-оптических датчиках, с особым акцентом на волоконно-оптические решетки Брэгга (англ: Fiber Bragg Grating – FBG) и датчики интерферометрические типа SOFO®. Эти преобразователи позволили интеграцию с контролируемым объектом (измерительная головка может быть встроена в структуру композиционного материала без ущерба для его механических свойств), а также характеризовались высокой чувствительностью измерения, широким диапазоном измерения, устойчивостью к электромагнитным помехам и искробезопасностью.

Затем были проведены собственные испытания композитных образцов (трубчатого типа и типа NOL) с использованием волоконно-оптических SHM как в условиях статической нагрузки, так и исследования ползучести. Была продемонстрирована полная применимость предлагаемой системы измерения для измерения деформации порядка 3%, а также определение сдвига на границе фаз (волокна - матрица). Некоторые экспериментальные результаты были сопоставлены с результатами численного моделирования. Проверена возможность калибровки оптической измерительной системы через одновременную запись сигналов акустической эмиссии, что позволило регистрировать накопления повреждений в композиционной структуре, подвергнутой постоянной нагрузке.

Композитные резервуары были подвергнуты таким нагрузкам как квазистатической, циклической и ударной, в соответствии с действующими стандартами. Протестированы новые резервуары и резервуары с запрограммированными повреждениями (порезы, расслоение). Емкости были изготовлены технологией намотки (англ: winding) и плетения (англ: braiding). Во всех случаях протестированы возможности SHM с использованием волоконно-оптических датчиков. Принята попытка определить процесс накопления повреждений композитного резервуара путем измерения локальных изменений деформации. Кроме того, были проведены исследования, которые позволили сравнить волоконно-оптические датчики с различной длиной измерительных головок и указаны наиболее выгодные решения.

Методом плетения длинного волокна были изготовлены резервуары высокого давления с интегрированными волоконно-оптическими датчиками типов FBG и SO-FO® с несущей структурой. Применение их непосредственно в производственном процессе, позволило на непрерывный анализ деформации конструкции как на стадии производства (плетение, инфильтрация, полимеризация), так и в ходе лабораторных испытаний.

Указаны также основные проблемы, связанные с моделированием композитных резервуаров и рассмотрены некоторые примеры исследований в этой области.

Дополнительно приведены примеры других лабораторных исследований систем SHM, основанных на волоконно-оптических датчиках, в частности для мониторинга: подвески спортивного автомобиля марки Формула Студент, полимерных изоляторов высокого напряжения, материалов с гигантской магнитострикцией (магнитореологический композит типа SMART) и композитных pultrud, использованных в качестве арматуры в стальных и бетонных строительных конструкциях.

Приведены примеры собственных исследований по применению волоконно-оптических SHM в области теплоэнергетики (мониторинг подвески и стен камеры сгорания котлов и композитных трубопроводов установки сероочистки газов сгорания).

Результаты, полученные в диссертации, собраны в виде выводов и заключений. Научные достижения были опубликованы в более чем пятидесяти работах (статьях в профессиональных журналах, трудах конференций, докладах), автором или соавтором которых является аспирант

Podziękowania

Chciałbym wyrazić swoją wdzięczność wszystkim osobom, które wspierały mnie swoją wiedzą, umiejętnościami i doświadczeniem, a bez których powstanie tej pracy nie byłoby możliwe. W szczególności dziękuję:

- Mojemu promotorowi, dr. hab. inż. Jerzemu Kalecie, prof. nadzw. PWr, za wszelką pomoc w trakcie realizacji niniejszej pracy, a także poza nią oraz wskazanie dróg dalszego rozwoju. Bez cennych uwag, dyskusji, zaangażowania oraz olbrzymiej cierpliwości Pana Profesora z pewnością niniejsza praca by nie powstała.
- Dr inż. Wojciechowi Błażejowskiemu, za dzielenie się ze mną swoją wiedzą i doświadczeniem z zakresu zbiorników i materiałów kompozytowych, a przede wszystkim za pomocną dłoń, w różnych aspektach życia, na którą zawsze mogłem liczyć.
- Prof. dr. hab. inż. Waławowi Kasprzakowi, Prof. dr. hab. inż. Markowi Rybaczkowi oraz dr. inż. Grażynie Ziętek, za „przymuszanie” mnie do częstych prezentacji w ramach środowych Seminariów, wszelkie uwagi i wskazówki wygłoszone w ich trakcie oraz poza nimi.
- Dr inż. Annie Sankowskiej za zaciekawienie mnie tematyką „światłowodów” oraz wsparcie w trakcie stawiania pierwszych kroków tej dziedzinie wiedzy.
- Dr. inż. Wojciechowi Mysze za pomoc w rozwiązywaniu problemów natury inżynierskiej oraz dodatkowe miejsce na serwerze instytutowym na moją rozległą pocztę.
- Olkowi Przygodzie za wspólne chwile spędzone na obiektach energetycznych i nie tylko.
- Wszystkim Kolegom z Laboratorium za wszelkie wsparcie i miłe słowa podczas realizacji niniejszej pracy, m.in.: Dorocie Aniszewskiej, Mirkowi Bocianowi, Damianowi Bodniewiczowi, Tomaszowi Czaplińskiemu, Agacie Czernuszewicz, Julicie Czopor, Romanowi Frątczakowi, Krzysztofowi Junikowi, Piotrowi Kotowskiemu, Michałowi Królewiczowi, Piotrowi Krysiakowi, Justynie Krzak-Roś, Danielowi Lewandowskiemu, Grzegorzowi Lesiukowi, Rafałowi Mechowi, Łukaszowi Maciejewskiemu, Maciejowi Pankowi, Monice Plaminiak, Krzysztofowi Plaminiak, Radkowi Rybczyńskiemu, Kubie Słowińskiemu, Przemkowi Wiewiórskiemu, Wojtkowi Wiśniewskiemu, Piotrowi Zajacowi.
- Panom Janowi Orłowskiemu oraz Grzegorzowi Burskiemu za pomoc w rozwiązywaniu „nierozwiązywalnych” problemów natury technicznej.
- Wszystkim pozostałym pracownikom I-19 oraz PWr, z których pomocy miałem okazję i przyjemność korzystać.
- Swojej Rodzinie za wsparcie, cierpliwość i wyrozumiałość w tym dość długim okresie czasu, a w szczególności Grecie i Karolkowi.