



Politechnika Wrocławska

Aplikacja światłowodowych metod czujnikowych do monitorowania ekstremalnie wytężonych konstrukcji kompozytowych

dr inż. Wojciech Błażejowski*

mgr inż. Paweł Gaśior*

dr hab. inż. Jerzy Kaleta*

dr inż. Anna Sankowska**

* Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej

** Politechnika Wrocławska, Zakład Metrologii Mikro- i Nanostruktur



Warszawa, 28-31 sierpnia 2007 r.



Plan prezentacji

1. Wysokociśnieniowy zbiornik kompozytowy jako konstrukcja ekstremalnie wytrzymała
2. Rola zbiorników w samochodowych paliwach gazowych
3. Cel monitorowania zbiorników
4. Światłowodowe metody pomiarowe - zalety, wady, rodzaje, cechy
5. Badania eksperymentalne - badania statyczne i cykliczne
6. Podsumowanie



Wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe

Zbiorniki wysokociśnieniowe do przechowywania CNG oraz H₂

Ciśnienie pracy: 150÷700 bar

Ciśnienia rozrywające: 2.35 x NWP

Ciśnienie badań cyklicznych: 1.25 x NWP

Liczba cykli: 45000

Temperatura pracy: -45°C ÷ 100°C

Wilgotność: 0÷100%

Odporność na czynniki chemiczne, mechaniczne



Zbiornik do CNG o nominalnym ciśnieniu pracy 350 bar - typ III

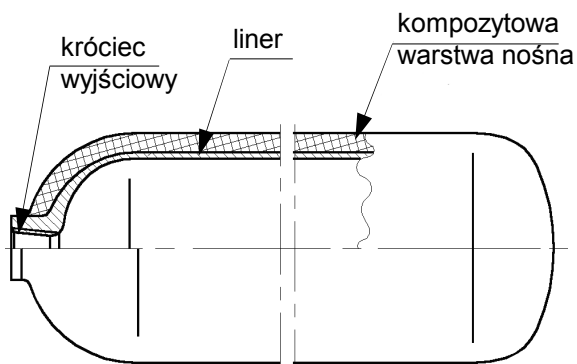


Wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe do przechowywania H₂ - typ IV

Klasyfikacja zbiorników wysokociśnieniowych

Wśród różnych konstrukcji możemy wyróżnić następujące generacje (typy) zbiorników:

- **Typ I** - zbiornik metalowy bezszwowy
- **Typ II** - zbiornik złożony z lineru metalowego (bezzwowy) z powłoką kompozytową, włókna ułożone obwodowo na części walcowej
- **Typ III** - zbiornik z lineru metalowego (bezzwowy lub spawany), cała powierzchnia pokryta materiałem kompozytowym
- **Typ IV** - zbiornik z lineru niemetalowego (np. polimer), cała powierzchnia pokryta materiałem kompozytowym

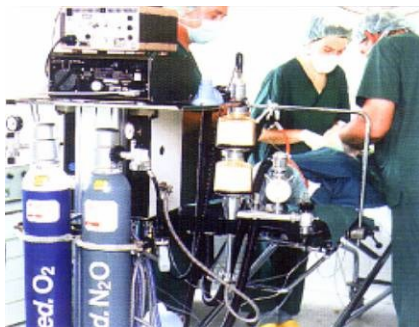


Schemat budowy wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego - typ IV



Zbiornik do przechowywania H₂ firmy Faber o nominalnym ciśnieniu pracy 700 bar - typ II

Zastosowania zbiorników kompozytowych



Medycyna



Sprzęt ratowniczy



Lotnictwo



Transport wodoru



Zbiorniki gazu ziemnego (CNG)
do zasilania pojazdów

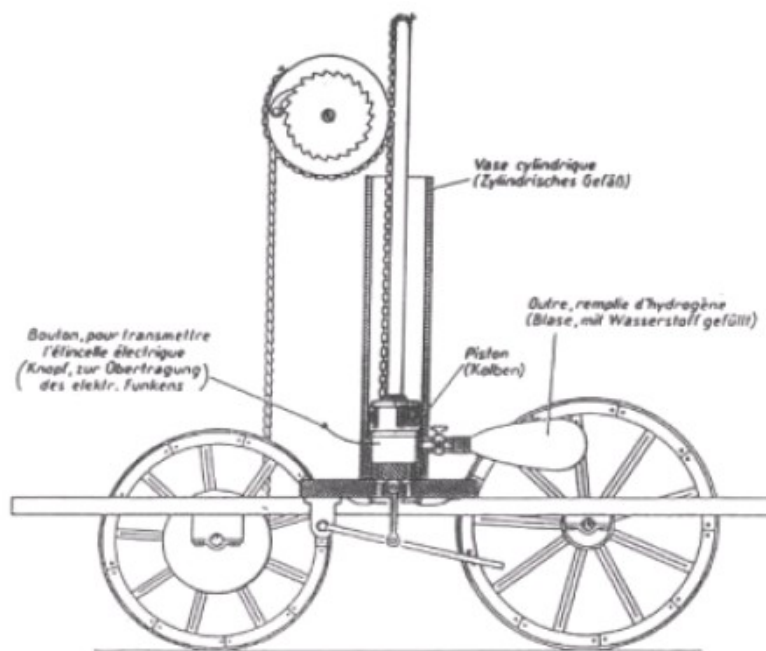


Zbiorniki wodoru do zasilania pojazdów



Rola zbiorników w samochodowych paliwach gazowych

Idea pojazdu na wodór ma już 200 lat



Darstellung eines Kraftfahrzeugs von Rivoz mit einem atmosphärischen Flugkolbenmotor, nach der Patentschrift vom 30. Januar 1807; Rivoz bezeichnete die Idee seines Motors als Anwendung der „Pistole, die de Volta“

The first technological step to hydrogen application



Pojazdy H₂ produkowane w Niemczech (2002-2006)



Ogniwa paliwowe w małych pojazdach

Wolf 2003



Aprilia 2003



NovArs
2000



Kärcher
2002



Masterflex
2005



Hunter 2003

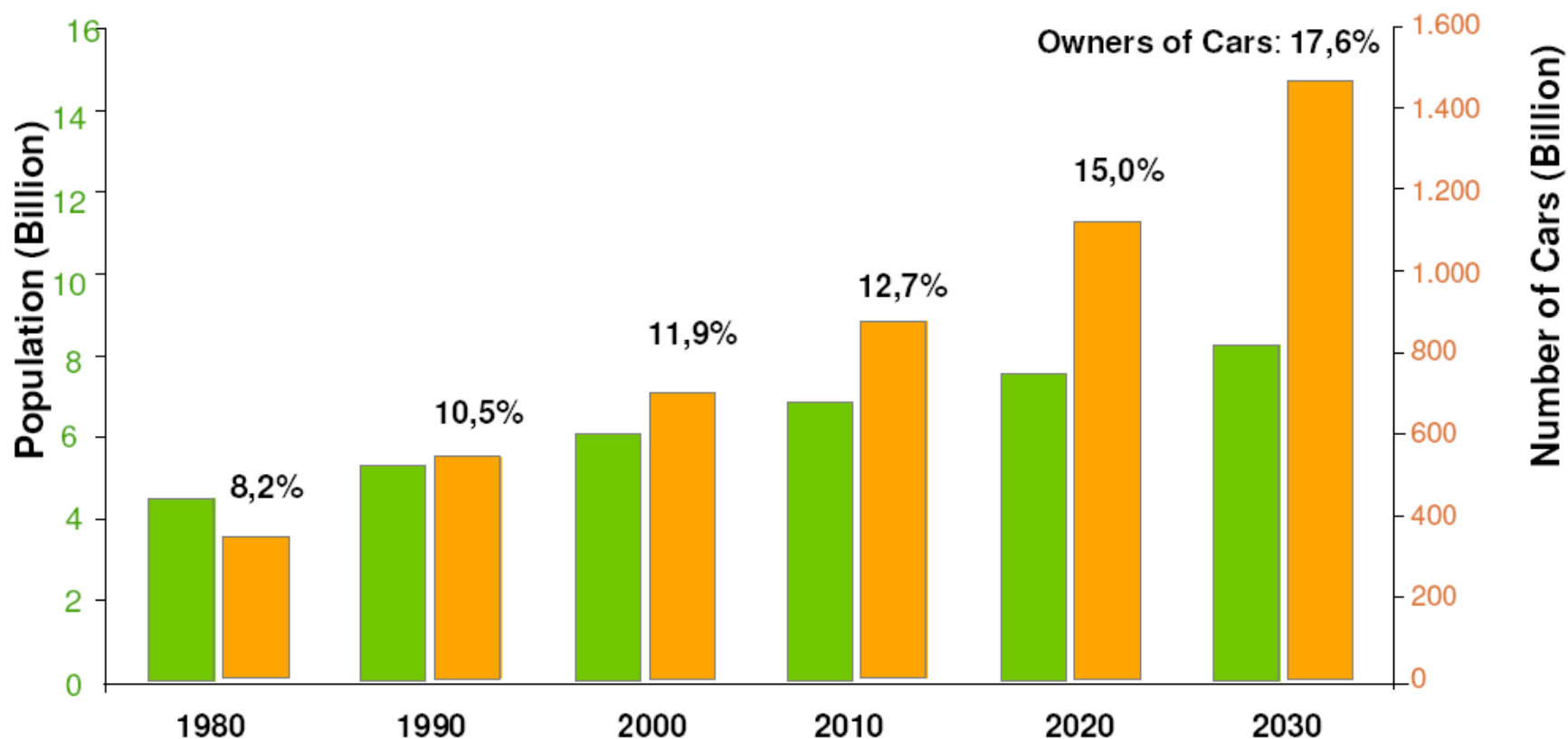


Sortimo



Proton Motor
FC 2003

Populacja ludności, liczba samochodów - prognoza



World Population and Number of Vehicle

Perspektywy rozwoju transportu na wodór

Hydrogen driven Passenger Cars

European Car fleet = $300 \cdot 10^6$ vehicles

HyWays

Total share car fleet [%]	2010 *	2020	2030	2040	2050
HyWays High**	-	3,3%	23,7%	59,5%	89,7%
HyWays Low***	-	0,7%	7,5%	23,6%	47,7%

$10 \cdot 10^6$ Vehicles

* Demonstration vehicles and fleets

** démarrage en 2015

*** démarrage en 2020



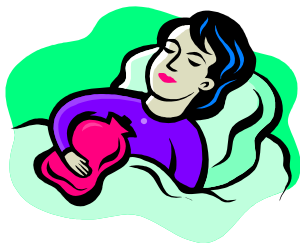
$2 \cdot 10^6$ vehicles/yr



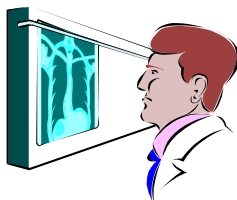
Cel monitorowania zbiorników

Jaki jest cel monitorowania konstrukcji?

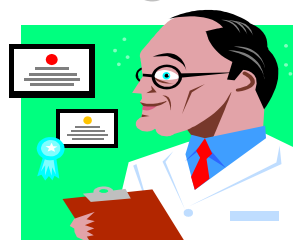
Ból



Badania



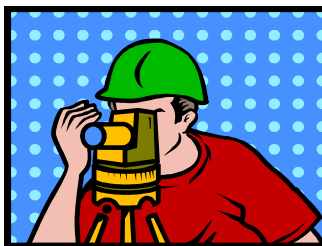
Diagnoza



Leczenie



Monitoring



Inspekcja



Diagnoza



Naprawa

Eksploracja samochodu zasilanego CNG (Compressed Natural Gas)



Marzec 2007, Seattle, USA

- Honda Civic CNG



Eksploracja samochodu zasilanego CNG (Compressed Natural Gas)



Marzec 2007, Seattle, USA

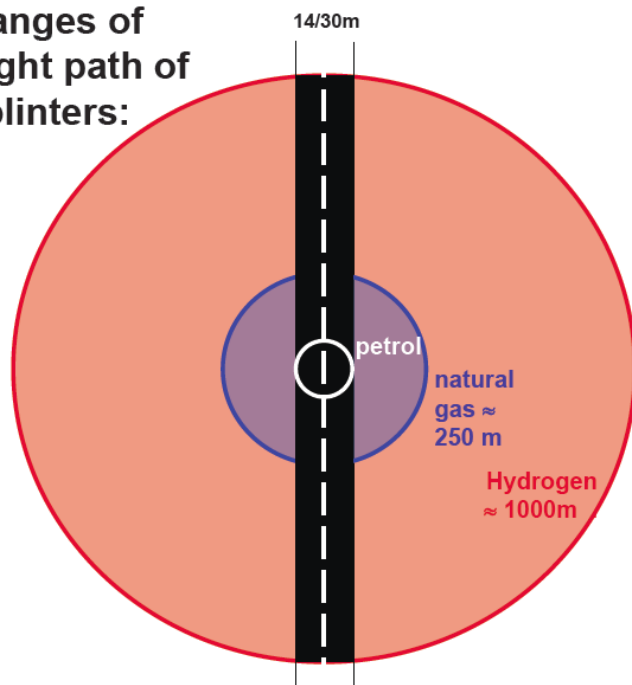
- Honda Civic CNG

www.seattle.gov/fire/publications/CNGAutoFire/CNG%20Auto%20Fire%20May%202007.ppt



Zagrożenie w przypadku eksplozji CNG i CH₂

Ranges of flight path of splinters:



Szacowany zasięg odłamków przy wybuchu zbiorników z różnymi rodzajami paliw

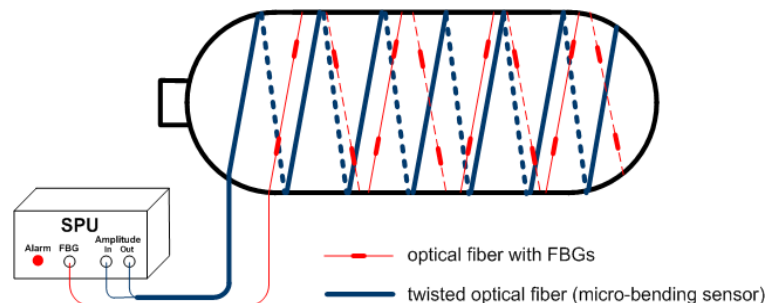


Badania poligonowe wysokociśnieniowych zbiorników H₂

Cel badań - założenia projektowe

System monitorowania zbiorników (on-board monitoring system):

- **Nisko budżetowy system ciągłego monitorowania stanu technicznego** wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych do przechowywania wodoru (nominalne ciśnienie pracy 700 bar)
- System monitorujący musi **wykrywać parametry krytyczne** związane np. z efektami starzeniowymi, zewnętrznymi uderzeniami, przekroczeniem dopuszczalnych zakresów ciśnienia lub/i temperatury w trakcie tankownia, użytkowania, itp.
- System **nie musi lokalizować** parametrów krytycznych (defektów)



Koncepcja systemu monitorującego dla wysokociśnieniowego zbiornika



Światłowodowe metody pomiarowe

Zalety światłowodowych metod pomiarowych

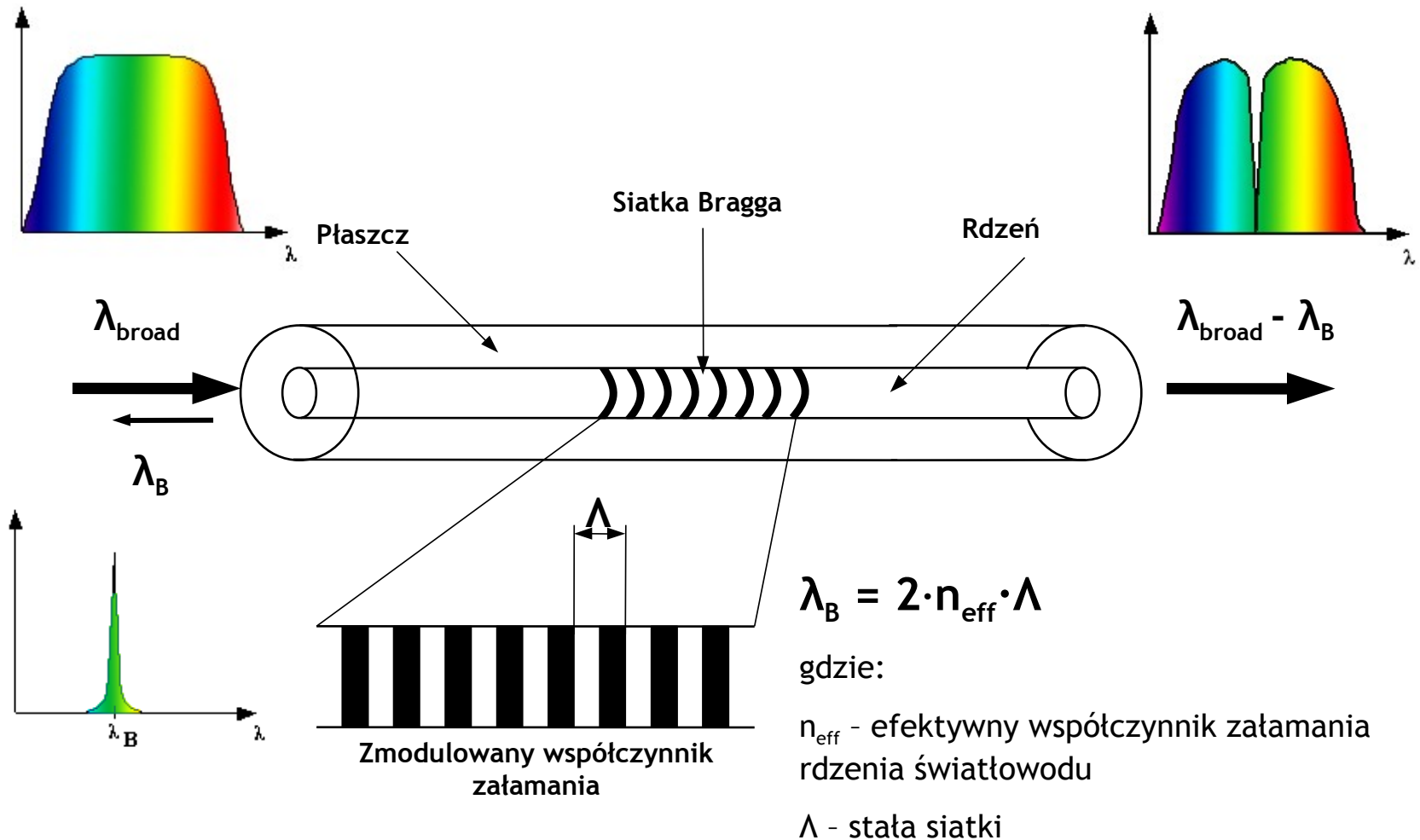
- Wysoka czułość pomiarowa przy pomiarach odkształceń (-5%.. 5%, rozdzielczość 1 $\mu\epsilon$) oraz temperatury (-270 .. +800°C, rozdzielczość 0.1 K)
- Liniowa charakterystyka odkształceniowa i temperaturowa
- Zalety wynikające z właściwości światłowodów:
 - odporność na pola elektromagnetyczne
 - wysokie temperatury
 - brak iskrzenia
 - małe wymiary i ciężar
 - łatwa integracja z monitorowanym obiektem



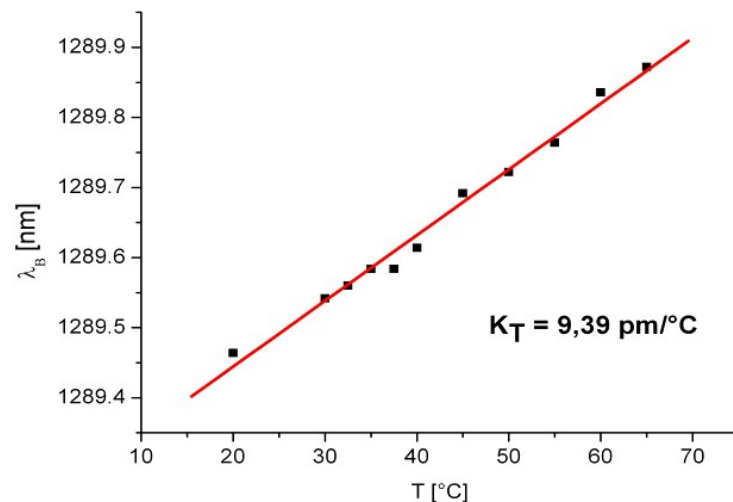
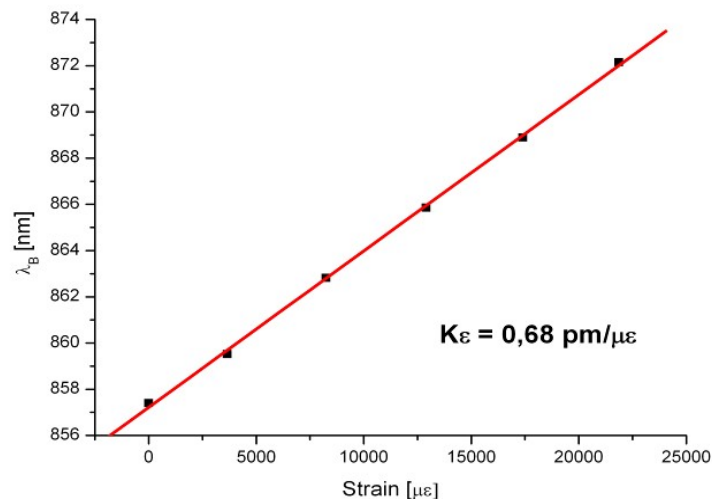
Klasyfikacja czujników światłowodowych

- 1. ZE WZGLĘDU NA MODULOWANY PARAMETR FALI ŚWIETLNEJ**
 - a) amplitudowe
 - b) interferencyjne
 - c) z modulacją długości fali
 - d) polaryzacyjne
- 2. WIELKOŚĆ (ROZMIAR) MIERZONEGO POLA FIZYCZNEGO**
 - a) punktowe
 - b) quasi - distributed
 - c) distributed
- 3. SPOSÓB MODULACJI FALI ŚWIETLNEJ PROPAGOWANEJ W ŚWIATŁOWODOWYM UKŁADZIE POMIAROWYM**
 - a) z modulacją wewnętrzną
 - b) z modulacją zewnętrzną

Światłowodowa siatka Bragga (Fiber Bragg Grating)



Związek pomiędzy zmianą długości fali Bragga a czynnikami zewnętrznymi

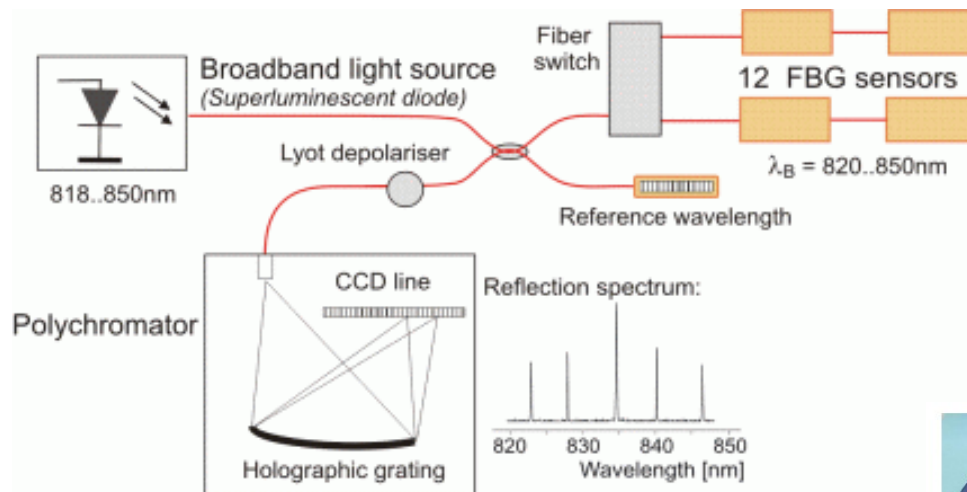


Zmiana długości fali Bragga pod wpływem odkształceń i temperatury

$$\Delta \lambda_B = K_\epsilon \Delta \epsilon + K_T \Delta T$$

λ_B [nm]	K_ϵ [pm/ $\mu\epsilon$]	K_T [pm/ $^{\circ}\text{C}$]
830	0,64	6,8
1300	1,0	10
1550	1,3	13

System pomiarowy z siatkami Bragga



E2000® fibre optic connectors to 2 sensor arrays

7 .. 12V / 0,25A power supply
two equivalent inputs

RS232 data to PC
(Win95/98/NT/2000/XP Software
for sensor interrogation)

Fibre entrance

SLD

CCD

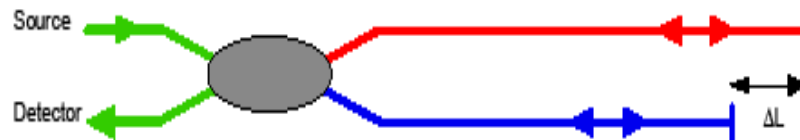
Imaging diffraction grating



Źródło: IPHT Jena

Czujniki interferencyjne

Światłowodowy interferometr Michelsona



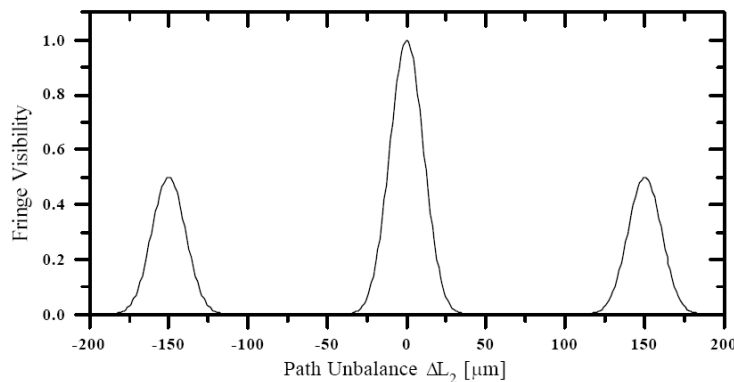
Schemat interferometru światłowodowego

Faza fali propagowanej w światłowodzie o długości L i stałej propagacji β

$$\Phi = L \cdot \beta$$

gdzie: $\beta = (2\pi/\lambda_0)(n_1 \sin \Theta)$

Zmiana fazy: $\Delta\Phi = \Delta L \cdot \beta + L \cdot \Delta\beta$



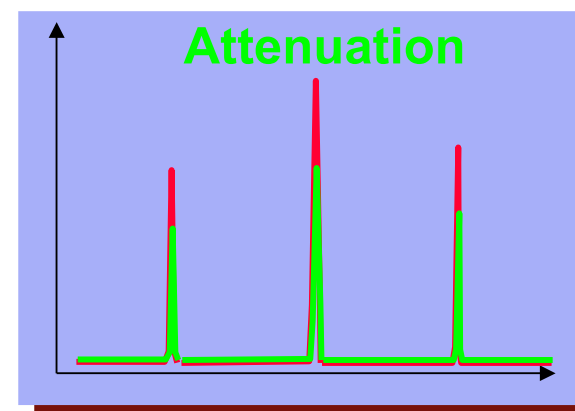
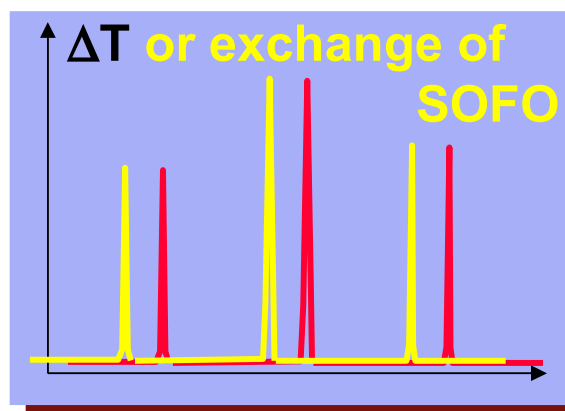
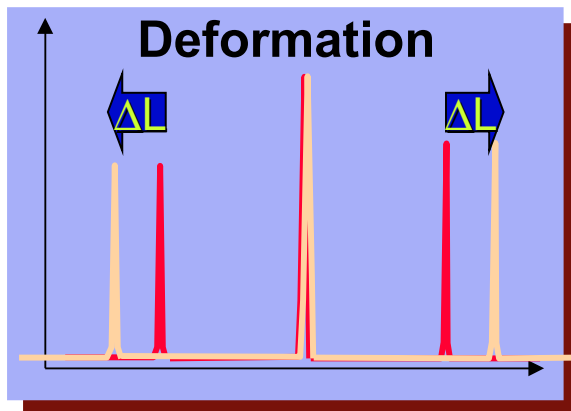
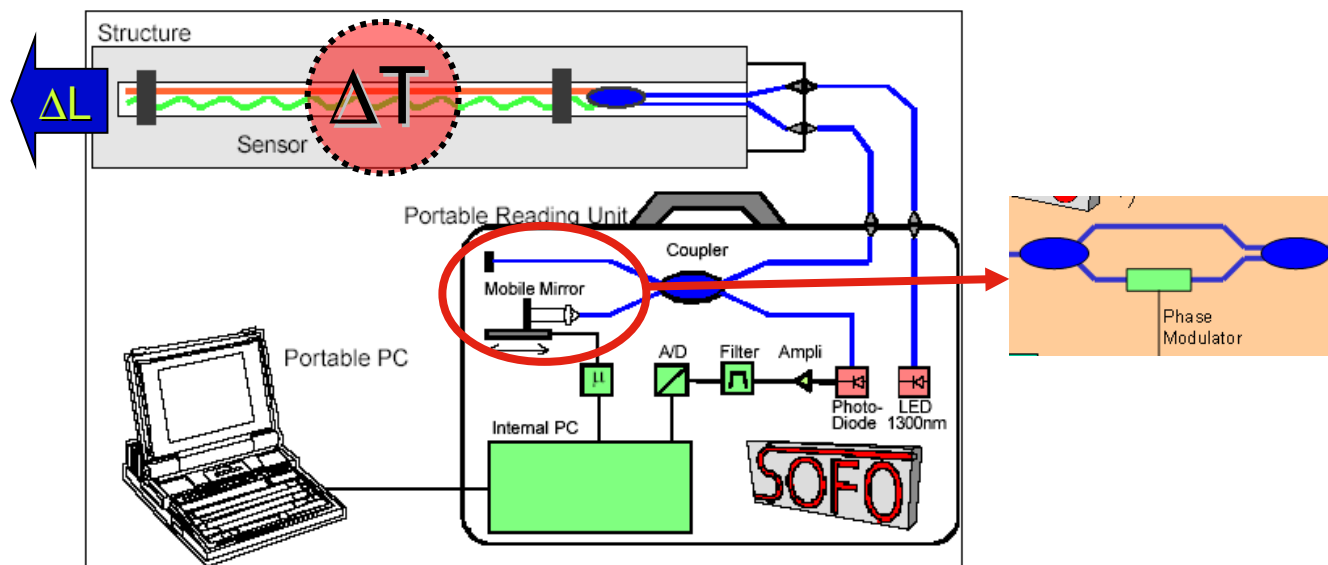
Prążki interferencyjne

Prążek zerowego rzędu $\Delta L_2 = 0$

Prążek plus pierwszego rzędu $\Delta L_2 = \Delta L_1$

Prążek minus pierwszego rzędu $\Delta L_2 = -\Delta L_1$

System z modulacją fazy fali świetlnej



System z modulacją fazy fali świetlnej

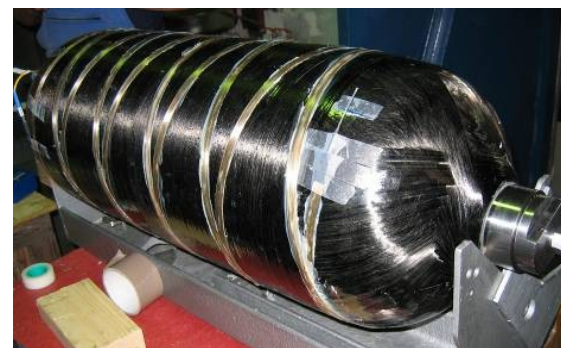
- Wysoka czułość pomiarowa przy pomiarach odkształceń (zakres pomiarowy rzędu kilku %, rozdzielczość $2 \mu\epsilon$)
- Zalety wynikające z właściwości światłowodów
- Długość ramion pomiarowych: 10 cm ÷ 20 m



Głowica pomiarowa SMARTape



System SOFO® do pomiarów statycznych



Zbiornik kompozytowy z zainstalowanymi czujnikami światłowodowymi w postaci SMARTape



Badania eksperymentalne

Laboratorium badania zbiorników wysokociśnieniowych

- Max. ciśnienie - 120 MPa
- Min. ciśnienie - < 2 MPa
- Liczba cykli - < 10 cykli / min (w zależności od pojemności zbiornika, ciśnienia cyklowania, etc.)
- Medium robocze - olej



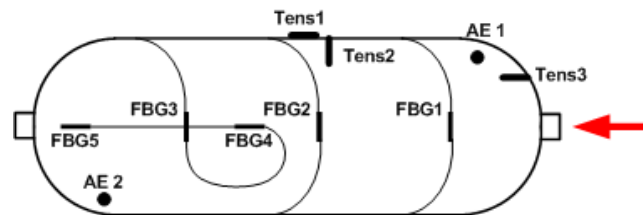
Pulsator hydrauliczny do badań cyklicznych

- Max. ciśnienie - 300 MPa
- Prędkość obciążania - $< 0,5$ MPa/s
- Medium robocze - woda



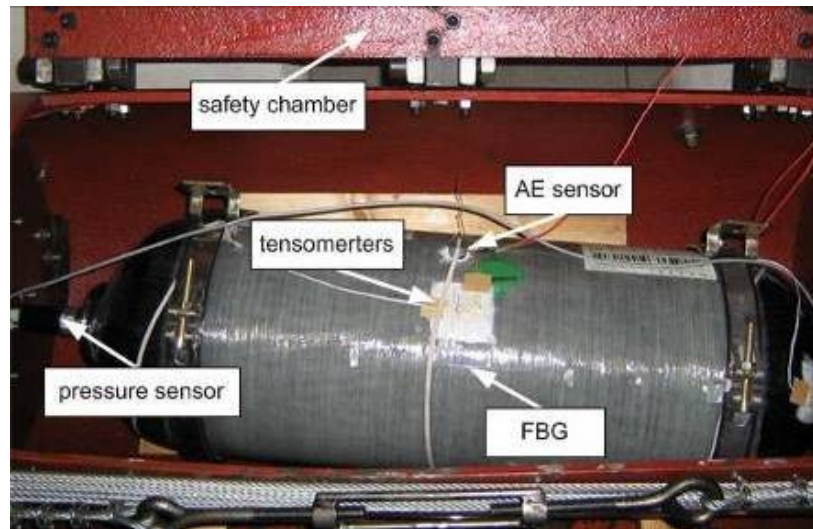
Pompa do badań niszczących

Badania cykliczne i niszczące - lokalizacja czujników



Stosowane czujniki:

- obwodowe: 3 x **FBG** i 1 x **tensometr**
- wzdluzne: 1 x **FBG** i 2 x **tensometry**
- **Emisja Akustyczna**

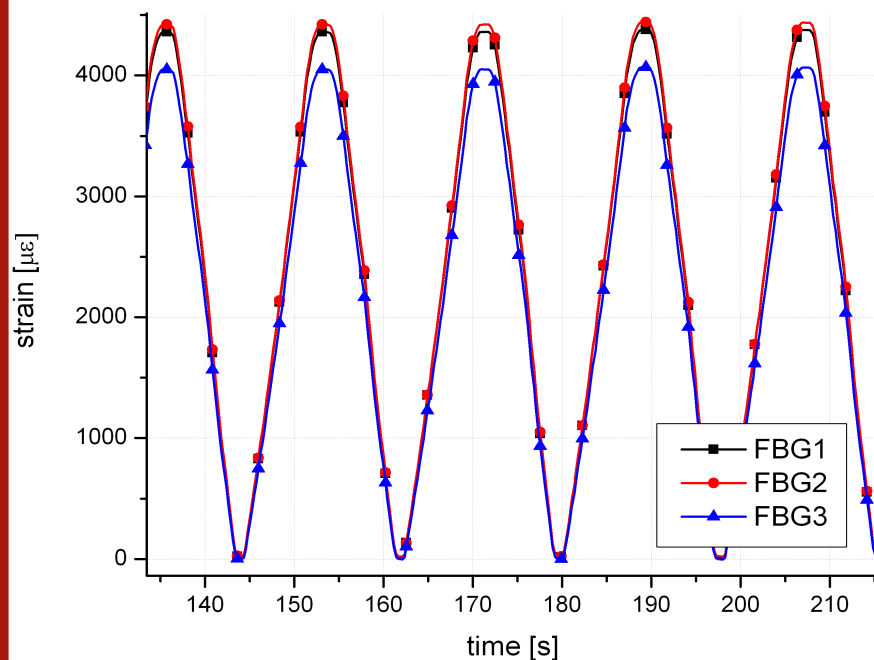


Gotowy do badań zbiornik zainstalowany w komorze bezpieczeństwa

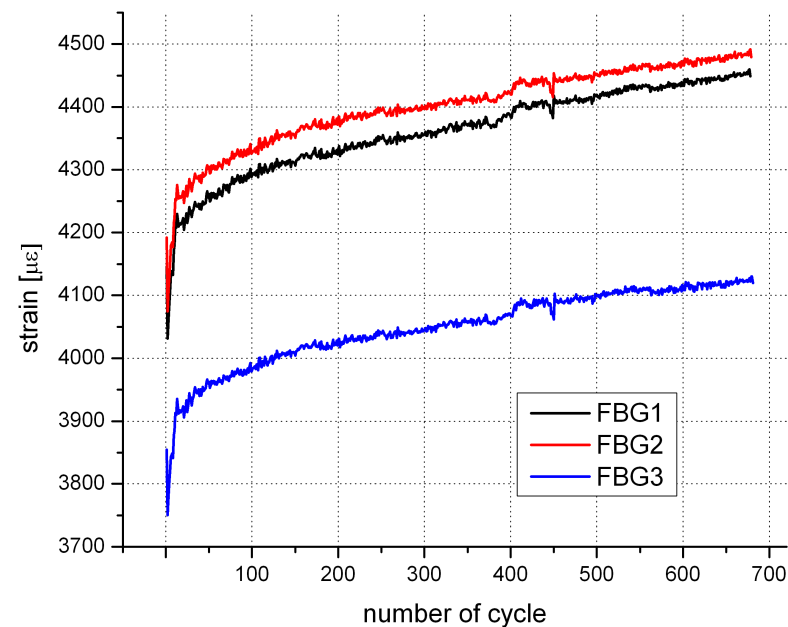
Badania cykliczne



(a)

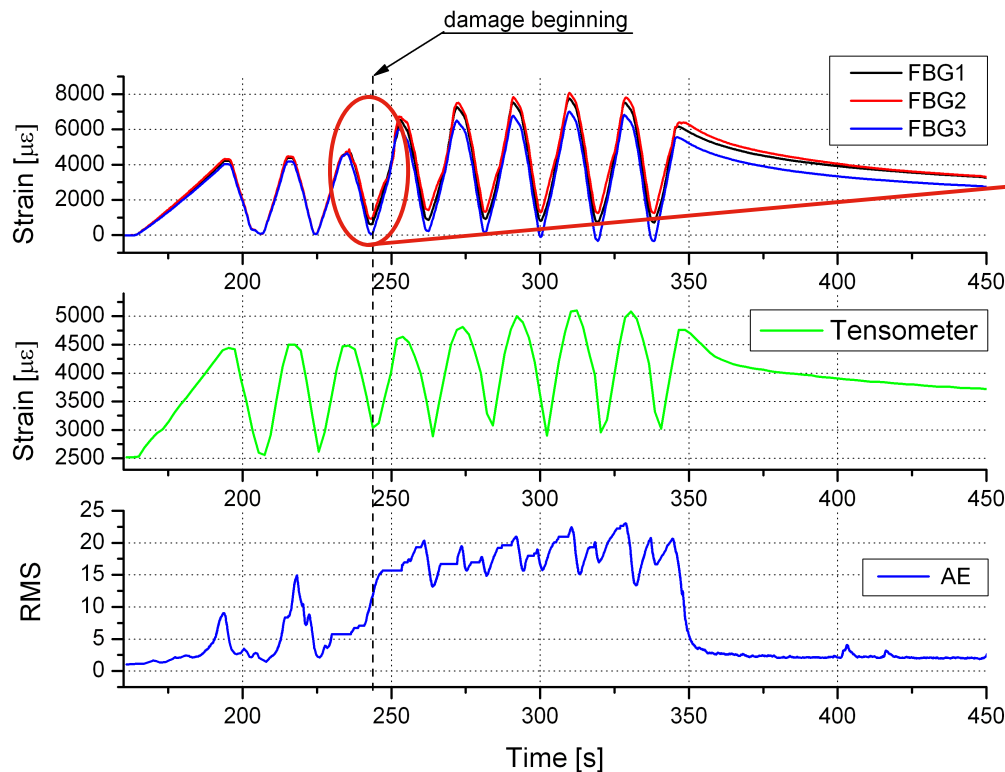


(b)

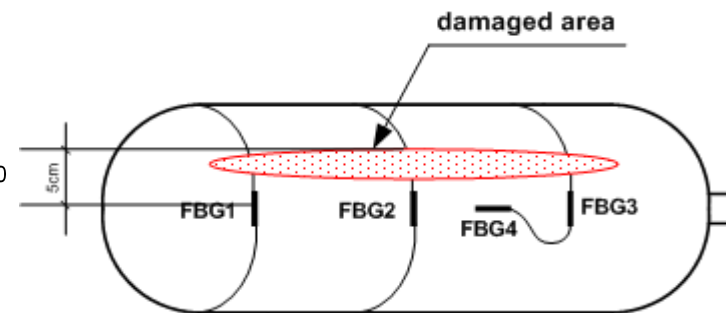


Lokalne odkształcenia zbiornika typ III mierzone w różnych punktach w kierunku obwodowym (a) oraz wzrost lokalnych odkształceń maksymalnych w funkcji liczby cykli dla $P = 875$ bar (b)

Badania cykliczne - moment zniszczenia FBG vs. EA oraz tensometry

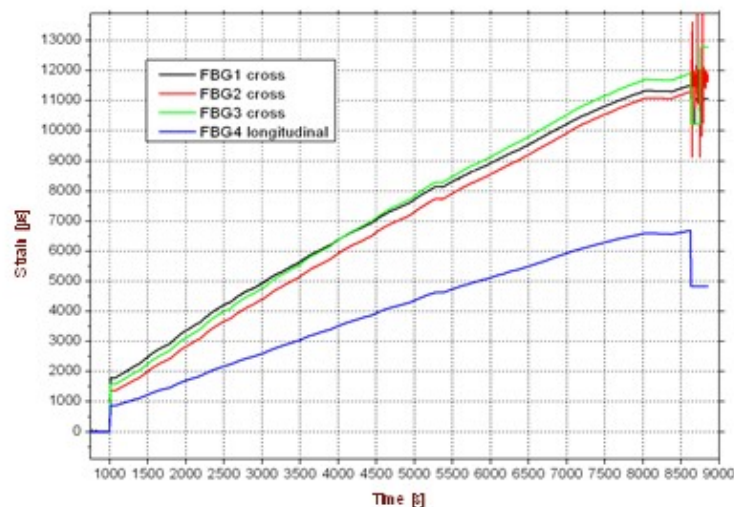
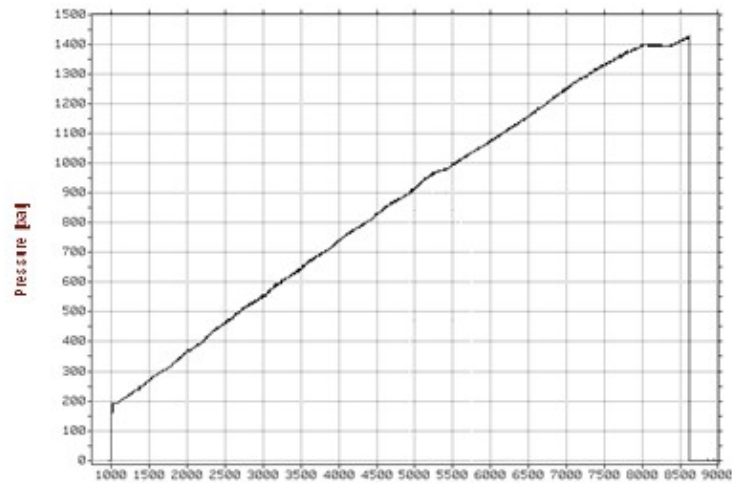


Zniszczenie zbiornika poprzedzone gwałtowną zmianą lokalnych odkształceń



Lokalne odkształcenia mierzone przez FBGs (a) oraz sygnał RMS z czujnika emisji akustycznej i odkształcenie wskazywane przez tensometr (b) w momencie uszkodzenia zbiornika typ III z linerem stalowym przy ciśnieniu 875 bar

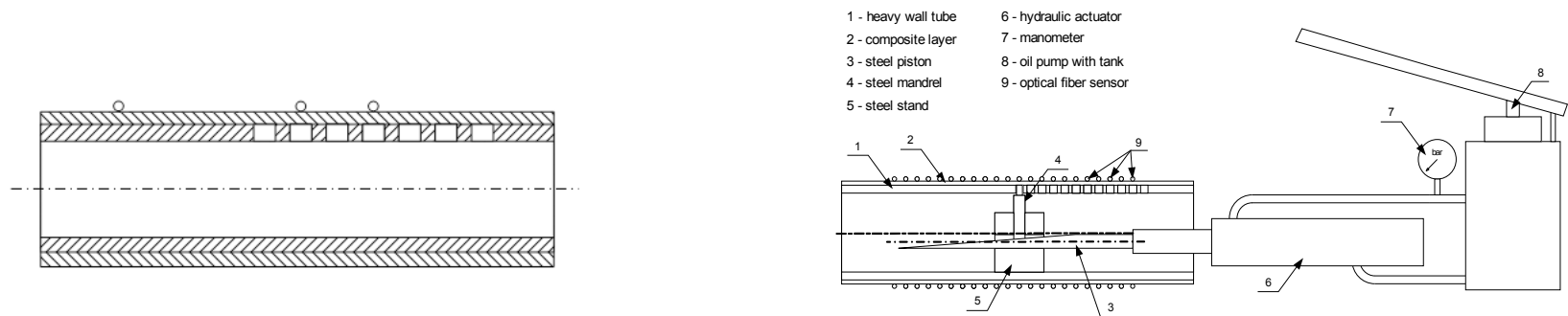
Badania niszczące



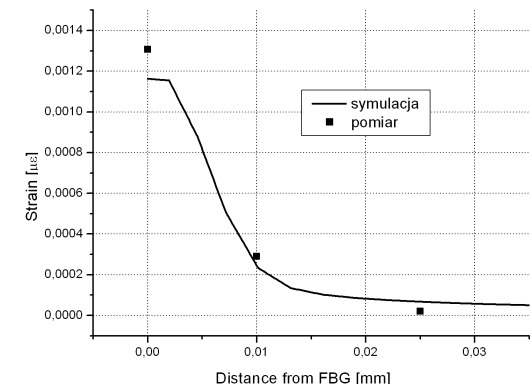
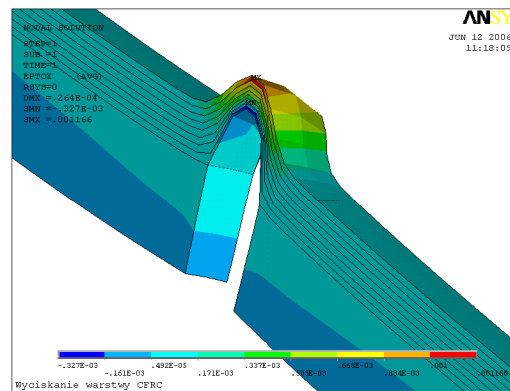
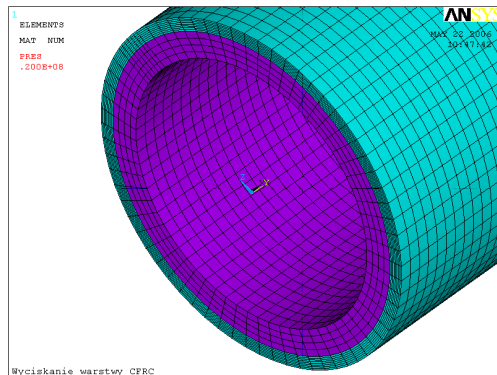
Rezultaty:

- ciśnienie rozrywania **1428 bar**
- zmiana nachylenia krzywej FBG3
- zbyt mała liczba czujników, aby zlokalizować defekt

Uszkodzenia „programowane” - porównanie wyników pomiarów i symulacji



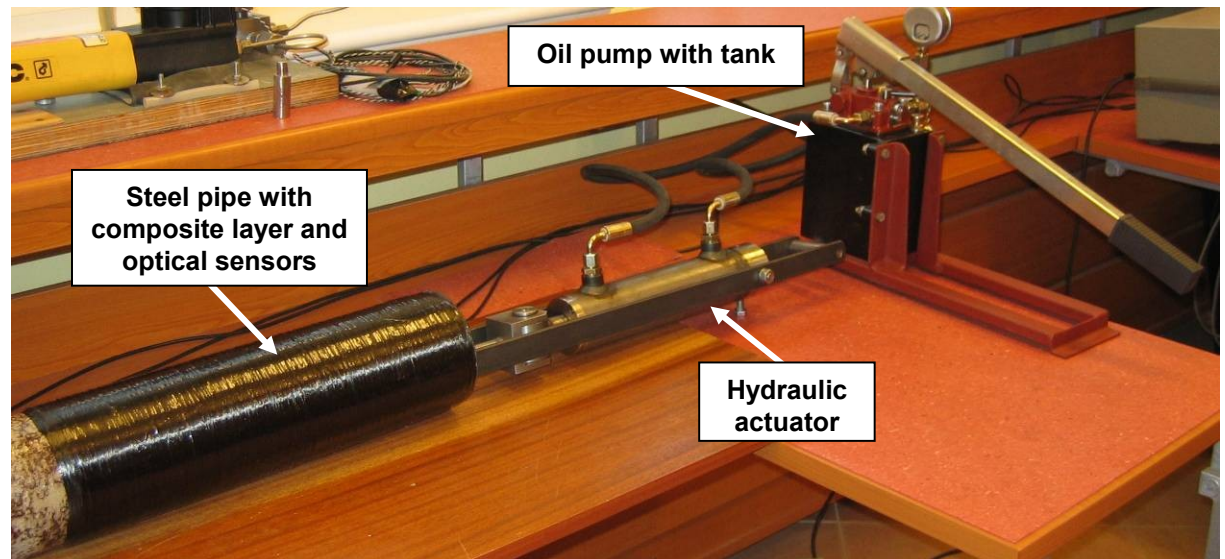
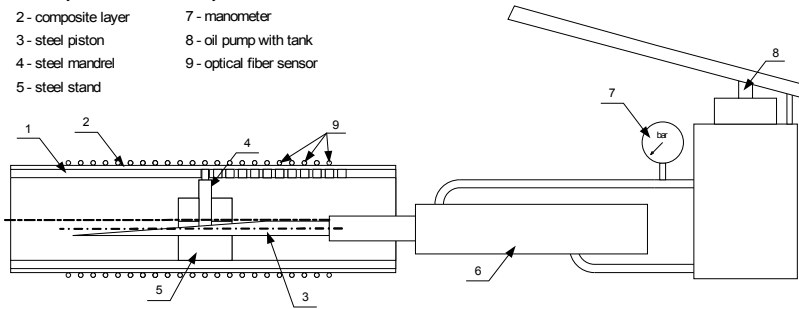
Rozmieszczenie czujników światłowodowych na badanym obiekcie oraz schemat stanowiska do symulacji defektów w rurze kompozytowej



Widok geometrii obiektu oraz ułożenia poszczególnych warstw (stalowej i kompozytowej), a także widok odkształceń w kierunku obwodowym oraz porównanie wyników eksperymentalnych i symulacji

Lokalizacja uszkodzeń w warstwie nawijanej

- 1 - heavy wall tube
- 2 - composite layer
- 3 - steel piston
- 4 - steel mandrel
- 5 - steel stand
- 6 - hydraulic actuator
- 7 - manometer
- 8 - oil pump with tank
- 9 - optical fiber sensor



Test stand for point deformation of composite layer

Klasyfikacja defektów

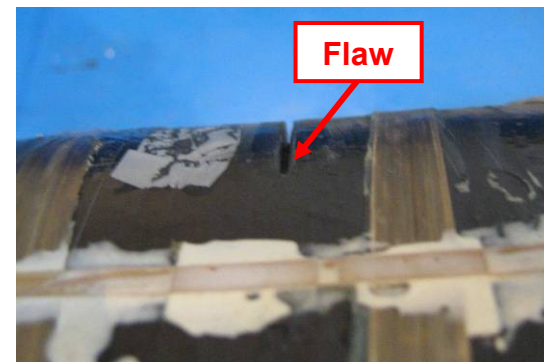
Normy badania zbiorników wysokociśnieniowych do przechowywania wodoru (np. Draft ECE Compressed Gaseous Hydrogen Regulation) „klasyfikują” dwa typy defektów: **nacięcie (flaw)** i **delaminacja (delamination)**.

- **Badania zbiornika z nacięciem (Composite flaw tolerance test)**

Defekt powinien być większy niż limit dla wizualnej inspekcji określony przez Producenta i nie mniejszy niż :

- a) 25mm x 1.25mm,
- b) 200mm x 0.75mm.

Nacięcia wykonane w poszyciu zewnętrznym zbiornika.

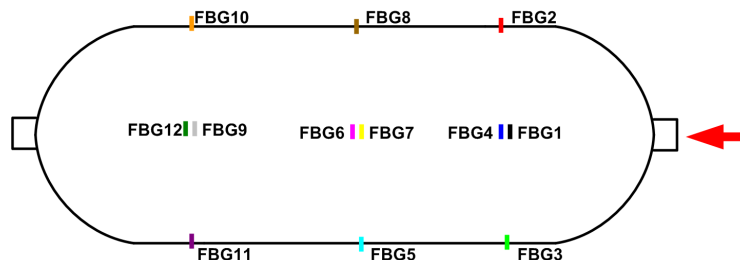


- **Badania zbiornika po uderzeniu (Impact damage test)**

Test powinien być przeprowadzony na zbiorniku bez przykręconych zaworów:

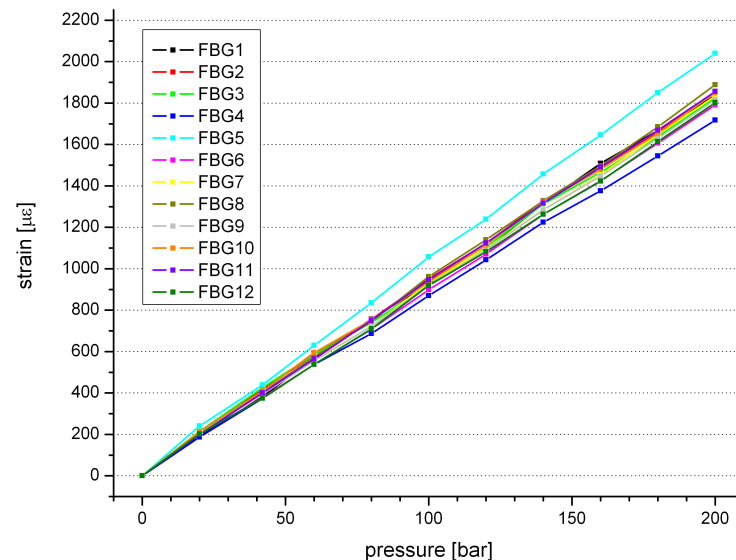
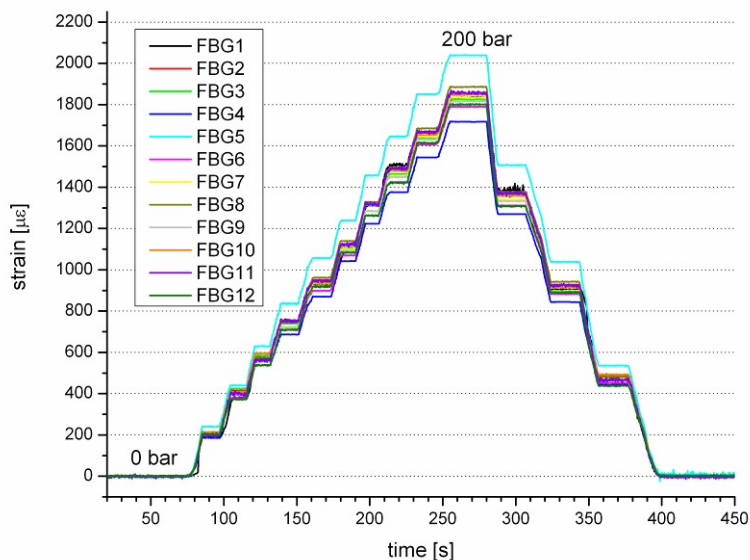
- a) Zrzucenie w pozycji horyzontalnej z wysokości 1.8 m
- b) Zrzucenie zbiornika na każdy z jego końców w pozycji pionowej z energią potencjalną 488 J
- c) Jednorazowe zrzucenie zbiornika pod kątem 45° z wysokości 1.8 m

Zbiornik bez defektów



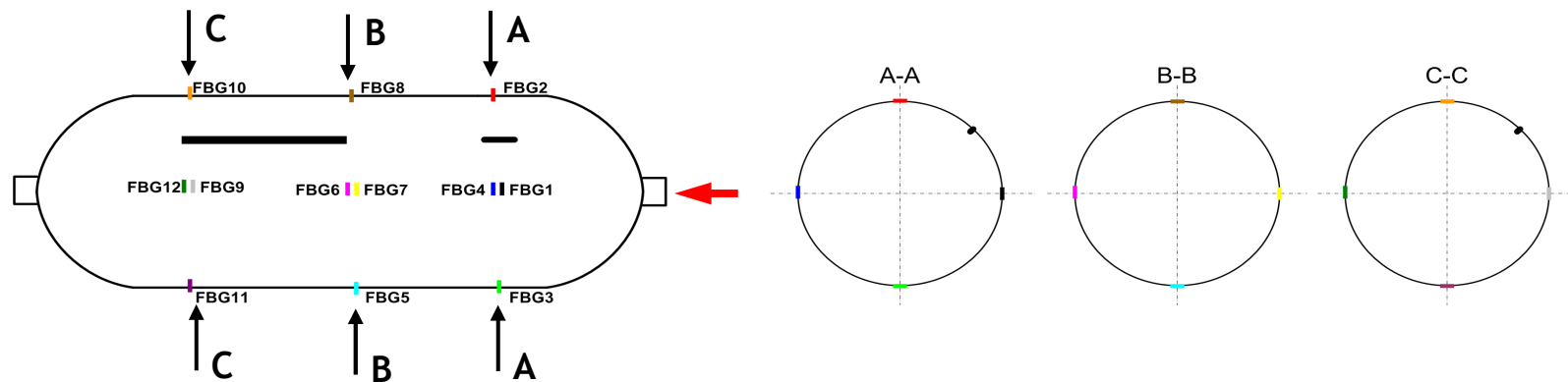
Badany zbiornik:
typ III, NWP = 207 bar

Rozmieszczenie 12 światłowodowych siatek Bragga (FBG) na zbiorniku

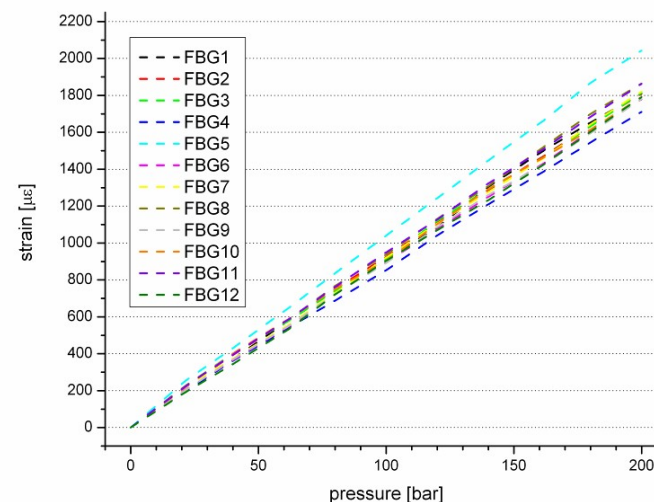


Test „step-by-step” oraz zmiana lokalnych odkształceń w funkcji ciśnienia w zakresie od 0 do 200 bar dla zbiornika bez defektów

Zbiornik z defektem

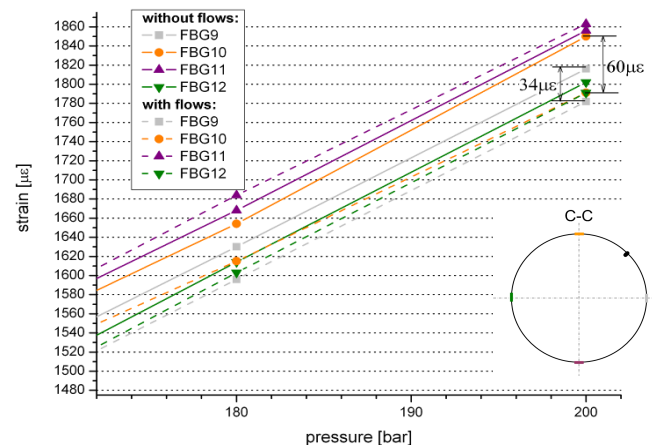
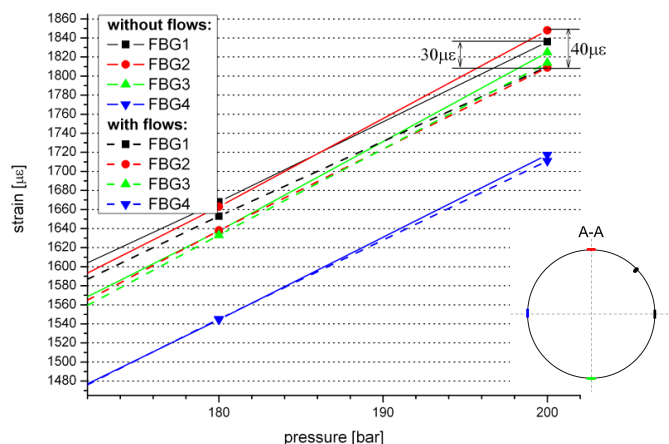


Rozmieszczenie defektów (nacięć) oraz czujników FBG na powierzchni zbiornika

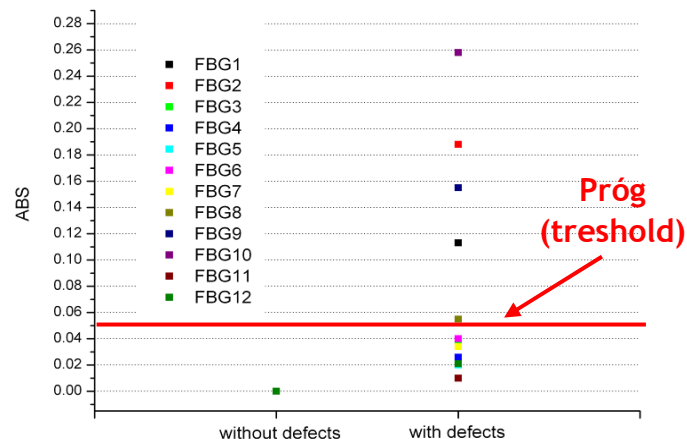
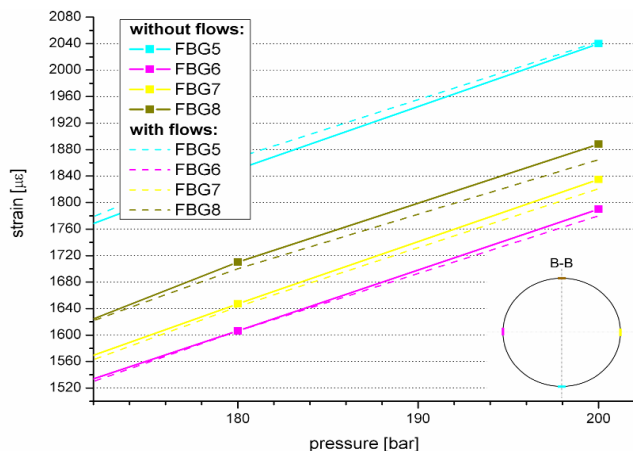


Lokalne odkształcenia zbiornika z defektem w zakresie ciśnień od 0 do 200 bar

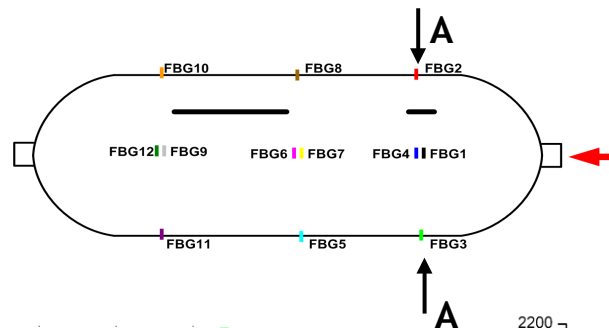
Zbiornik z defektem - analiza wyników w różnych przekrojach



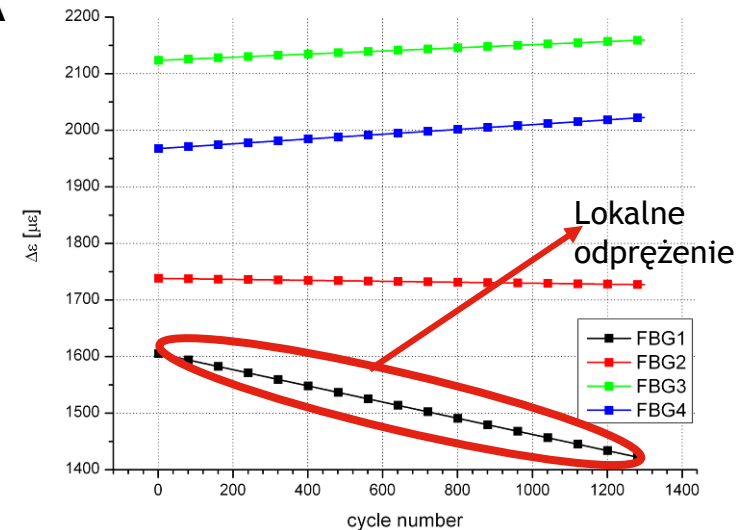
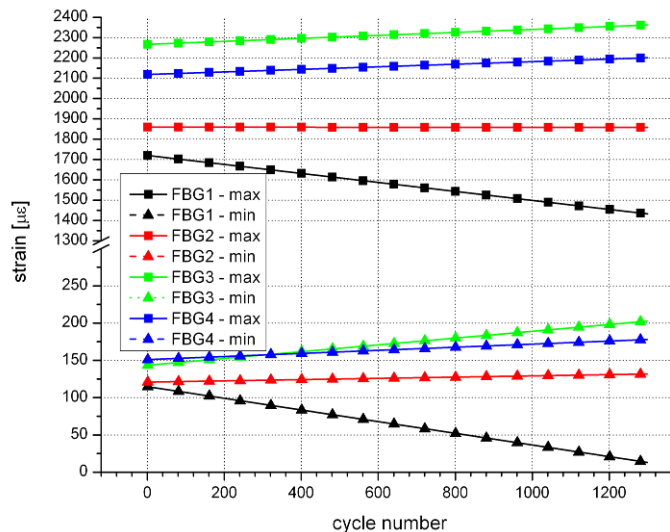
Zmiana podatności zbiornika na odkształcenia



Badania cykliczne zbiornika z defektami

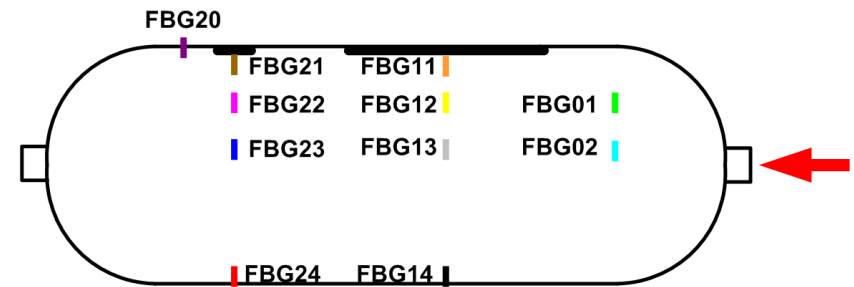


Badany zbiornik:
typ III, NWP = 207 bar

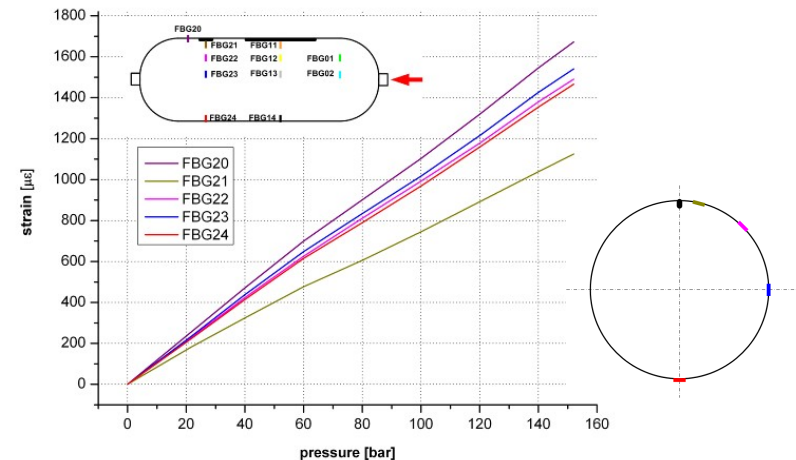
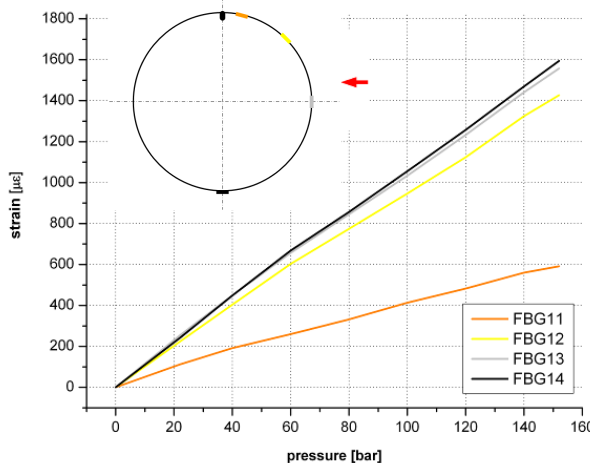


Lokalne odkształcenia zdefektowanego zbiornika w przekroju A-A dla ciśnienia 20 bar (min) oraz 258,5 bar (max), a także amplituda lokalnie mierzonych odkształceń w funkcji liczby cyklicznych obciążeń zbiornika w zakresie 20 ÷ 258,5 bar

Badania statyczne zbiornika wstępnie zdefektowanego



Uszkodzony wstępnie zbiornik oraz rozmieszczenie światłowodowych siatek Bragga (FBG) na zbiorniku



Lokalne zmiany odkształceń w zakresie ciśnień od 0 do 150 bar dla dwóch różnych przekrojów



Podsumowanie

Wnioski

- Uzyskane wyniki eksperymentalne potwierdzają, iż czujniki światłowodowe, ze szczególnym uwzględnieniem światłowodowych siatek Bragga (FBG) mogą być stosowane do kontrolowania stanu technicznego wysokociśnieniowych zbiorników w czasie ich eksploatacji.
- Zastosowane w pomiarach czujniki FBG informują o lokalnych wartościach odkształceń warstwy kompozytowej zbiornika spowodowanych ciśnieniem wewnętrznym. Zależność ta ma charakter liniowy w całym zakresie pomiarowym.
- Wykazano wstępnie, iż możliwe jest wczesne wykrycie pojawiających się defektów w strukturze materiału kompozytowego.
- Testy ciśnieniowe przeprowadzone dla zbiornika z wbudowanymi defektami wskazują na zaburzenie symetrii pola odkształceń zbiornika, wynikające z nieciągłości kompozytowej warstwy nośnej.
- Zaproponowane metody pomiarowe można zastosować w przypadku innych wysokowytężonych konstrukcji

Dalsze prace

- Przeprowadzenie badań porównawczych systemów opartych na FBG oraz systemów interferometrycznych (SOFO®).
- Przeprowadzenie badań nad zbiornikiem z drugim rodzajem defektu - delaminacja.
- Opracowanie modelu zbiornika oraz przeprowadzenie odpowiednich symulacji, tak by optymalnie rozmieścić czujniki na jego powierzchni.
- Sprawdzenie poprawności działania systemu monitorującego w komorze klimatycznej (-45°C oraz 90°C).

Inne aplikacje światłowodowych metod pomiarowych





Dziękuję za uwagę