

## **Badania zmęczeniowe ciśnieniowych zbiorników kompozytowych przeznaczonych do magazynowania paliw gazowych w pojazdach**

W pracy opisano możliwości badawcze Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej w zakresie zbiorników ciśnieniowych na gazy, stanowiące paliwo w pojazdach lądowych. Przedstawiono parametry eksploatacyjne unikatowej aparatury badawczej przeznaczonej do badań zmęczeniowych wymaganych przez normy. Podano przykład wyników badań zmęczeniowych kompozytowego zbiornika wysokociśnieniowego, przeznaczonego do magazynowania paliwa wodorowego w pojazdach.

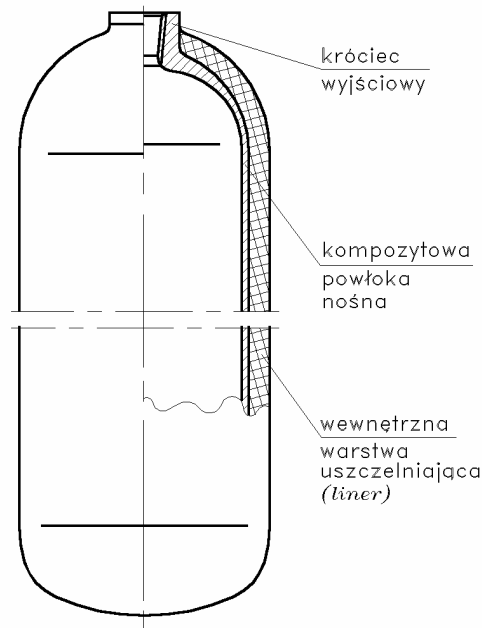
### **1. WSTĘP**

Obecnie na świecie bardzo dynamicznie rozwija się wykorzystanie paliw gazowych (LPG, CNG, wodór) do zasilania pojazdów. Najwięcej pojazdów zasilanych CNG porusza się w Argentynie (ok. 830 tys.). W Europie liderem są Włochy (ponad 430 tys.). W ciągu ostatnich pięciu lat najszybszy wzrost liczby pojazdów, nawet dziesięciokrotny, zanotowano w USA, Chinach, Niemczech, Szwecji i Japonii. W omawianym zastosowaniu korzystne, między innymi jest, aby zbiorniki na paliwo gazowe były lekkie. Warunek ten spełniają zbiorniki kompozytowe. Stosowanie zbiorników kompozytowych umożliwia prawie czterokrotną redukcję masy zbiornika w porównaniu do zbiornika stalowego. Zbiorniki kompozytowe na gazy znajdują liczne zastosowania nie tylko jako zbiorniki paliwa w pojazdach samochodowych. Ocenia się, że aktualnie produkowana liczba rodzajów (różnorodność ze względu na zastosowania, konstrukcję i technologię wykonania) gazowych zbiorników kompozytowych wynosi około 700.

### **2. BUDOWA ZBIORNIKÓW KOMPOZYTOWYCH**

Na rys. 1 przedstawiono schemat budowy wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego. Podstawowymi elementami jego budowy są:

- Nieprzepuszczalna wykładzina wewnętrzna zwana w nomenklaturze anglosaskiej linerem, może być wykonana z metalu lub tworzywa sztucznego, zwykle liner stanowi warstwę wewnętrzną, nieprzepuszczalną dla gazu,
- kompozytowa warstwa nośna wykonana z wysokowytrzymałych włókien (szklane, węglowe) nasyconych żywicą, włókna warstwy kompozytowej ułożone są w sposób uporządkowany i zaprogramowany, stosownie do występujących obciążeń.



Rys. 1. Schemat budowy wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego

W projekcie regulacji na zbiorniki na paliwo wodorowe rozróżnia się 4 typy zbiorników ciśnieniowych [1].

- - typ 1 - zbiornik metalowy bezszwowy,
- -typ 2 - liner metalowy bezszwowy z powłoką kompozytową zawierającą włókna ułożone obwodowo na części walcowej zbiornika,
- - typ3 – liner metalowy bezszwowy lub spawany z powłoką kompozytową zawierającą włókna ułożone zarówno obwodowo, jak i wzdłużnie,
- - typ 4 – liner niemetalowy z powłoką kompozytową zawierającą włókna ułożone zarówno obwodowo, jak i wzdłużnie.

Proponuje się też podaną poniżej klasyfikację systemów na wodór ze względu na nominalne ciśnienie pracy[1]:

- klasa 0 – wysokociśnieniowa, nominalne ciśnienie pracy większe niż 3,0 MPa,
- klasa 1 – średniociśnieniowa, nominalne ciśnienie pracy większe niż 0,45 MPa z włączeniem 3,0 MPa,
- klasa 2 – niskociśnieniowa, nominalne ciśnienie pracy do 0,45 MPa włącznie

Do zalet zbiorników kompozytowych można zaliczyć:

- brak iskrzenia przy otarciach i uderzeniach,
- brak odłamków w razie zniszczenia zbiornika ( np. przestrzelenia, rozerwania),
- duża odporność chemiczna, w tym odporność na korozję,
- brak wyraźnego przejścia plastyczno-krucho w niskich temperaturach,
- powstanie nieszczelności przed rozerwaniem,

### 3. METODYKA BADAWCZA ZBIORNIKÓW KOMPOZYTOWYCH NA PALIWA GAZOWE DO POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

W Unii Europejskiej wymagania w zakresie bezpieczeństwa dla zbiorników kompozytowych na paliwa gazowe w pojazdach są objęte dyrektywą 99/36/EC, lecz do chwili obecnej brakuje dokumentów zharmonizowanych. Istnieje wiele norm opisujących badania i

wymagania w zakresie tych wyrobów oraz są prowadzone intensywne prace dla opracowania nowych standardów[1-17].

Przykładowo, norma uznaniowa PN-EN 12245 :2002 dotyczy butli do gazów wielokrotnego napełniania, wykonanych z kompozytów całkowicie wzmocnionych o pojemności wodnej do 450 l [2]. Specyfikuje minimum wymagań dla materiałów, projektu, konstrukcji, badania prototypów i rutynowych sprawdzeń produkcji dla zbiorników kompozytowych na gazy sprężone, ciekłe i rozpuszczone. Stosuje się do zbiorników z linerem metalowym (spawanym i bezszwowym) lub niemetalowym (lub złożonym z obu typów materiałów) wzmocnionych kompozytem nawijanym zawierającym włókna szklane, węglowe lub aramidowe ( lub ich mieszaninę) nasycone matrycą. Stosuje się również do zbiorników bez linera.

Proponowane badania w normach są, przykładowo, następujące:

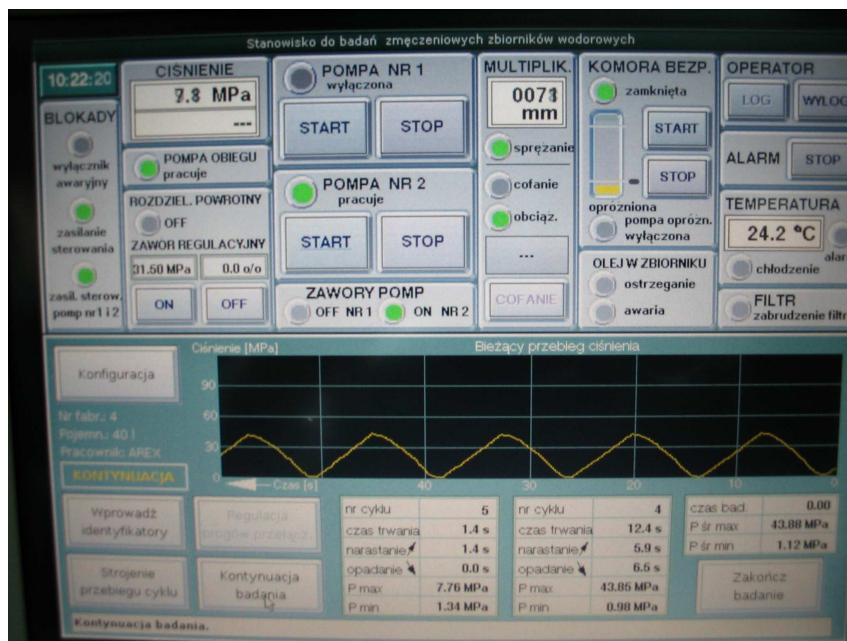
- materiału kompozytowego z włączeniem klejów,
- materiału linera,
- rozrywanie linera i cylindra,
- odporność na cykle ciśnieniowe w temperaturze otoczenia,
- odporność na cykle ciśnieniowe w temperaturach ekstremalnych (+ 85C, mniej niż – 40C),
- upadki (uderzenia) zbiornika,
- przepuszczalność zbiornika,
- test ogniowy,
- odporność chemiczna.

Szczególnie czasochłonne oraz kosztowne ze względu na stosowane wyposażenie są testy zmęczeniowe, odporności na cykle ciśnieniowe. Liczba cykli ciśnieniowych zależy od typu zbiornika i może wynosić nawet kilkadziesiąt tysięcy.

Na wyposażeniu Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Politechniki Wrocławskiej znajduje się urządzenie umożliwiające badania odporności na cykle ciśnieniowe zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w temperaturach ekstremalnych rys.2. Umożliwia ono wytwarzanie cykli ciśnieniowych w zakresie do 120MPa oraz rozrywanie zbiorników do ciśnień niszczących 300Mpa. Maksymalna pojemność badanych zbiorników może wynosić nawet 100litrów. Urządzenie jest sterowane komputerowo i może rejestrować charakterystykę każdego cyklu z wyszczególnieniem charakterystycznych danych liczbowych, np. maksymalne ciśnienie, długość cyklu, objętość cieczy wtłoczonej w cyklu itp. Program sterujący porównuje parametry kolejnych cykli ze sobą i w przypadku zarejestrowania różnic określonych przez operatora urządzenie samoczynnie wyłącza się sygnalizując awarie. Na rys. 3 przedstawiono widok okna sterującego urządzeniem.



Rys. 2. Urządzenie hydrauliczne do badań zmęczeniowych zbiorników.



Rys. 3. Widok okna sterującego urządzenia

Oryginalna konstrukcja urządzenia polega na zastosowaniu rozdzielaczy proporcjonalnych zamiast serwowaworów. Przyjęte rozwiązanie jest optymalne energetycznie oraz zapewnia bezawaryjną pracę urządzenia, natomiast serwowawory stosowane przy tak dużych ciśnieniach i przepływach nie sprawdzają się, tzn. są mało trwałe oraz krzywa cyklu przy obniżaniu ciśnienia posiada nieciągłości (fluktuacje). Urządzenie wyposażone jest także w zbiornik oleju o objętości ponad 2000 litrów oraz układ chłodzenia o mocy 85KW. Tak duża moc układu chłodzenia jest związana z łączną mocą ok. 150KW zastosowanych w urządzeniu silników elektrycznych do napędu pomp olejowych. Wydajność pomp przy wymienionych parametrach technicznych

urządzenia musi wynosić co najmniej 200 litrów / minutę, przy średnim ciśnieniu 30MPa! Tak wysokie parametry urządzenia są związane ze znacznymi odkształceniami zbiorników kompozytowych, które mogą osiągnąć nawet 10% objętości (standardy dopuszczają taką deformację zbiornika). Ponadto przy ciśnieniach rzędu 100MPa występuje znaczna ściśliwość cieczy roboczej

Wymienione urządzenie hydrauliczne współpracuje z komorą klimatyczną. Podstawowe parametry komory są następujące:

- wymiary wewnętrzne komory – szerokość 176 cm, wysokość – 180 cm, długość 325 cm,
- temperatura minimalna -  $-50^{\circ}\text{C}$ ,
- temperatura maksymalna -  $+90^{\circ}\text{C}$
- wilgotność – 95%.

W tabeli 1 zamieszczono wartości wymaganych minimalnych ciśnień niszczących dla próby ciśnieniowej prowadzonej do zniszczenia oraz współczynniki bezpieczeństwa przyjmowane przy projektowaniu powłok kompozytowych.

**Tabela 1**

Wartości minimalnych ciśnień niszczących w MPa (dla CNG / Wodór) oraz współczynniki bezpieczeństwa. \*) - wartości dla zbiorników wodorowych z dokumentacją obliczeniową. \*\* - dotyczy zbiorników wodorowych z dokumentacją obliczeniową według udziałów włókien z uwzględnieniem w/w współczynników

	Typ 1		Typ 2		Typ 3		Typ 4	
Materiał powłoki Nośnej	Wsp. bezp.	Ciśn. niszcz.	Wsp. bezp.	Ciśn. niszcz.	Wsp. bezp.	Ciśn. Niszcz.	Wsp. bezp.	Ciśn. niszcz.
Metal	2,25	45/158	-----		-----		-----	
Kompozyt szklany	-----		2,75 2,5*	55/193	3,65 3,5*	73/256 245*	3,65	73/256
Kompozyt aramidowy	-----		2,35	47/165	3,1 3,0*	62/217 210*	3,1	62/217
Kompozyt węglowy	-----		2,35	47/165	2,35	47/164	2,35	47/164
Kompozyt Hybrydowy	-----		**					

Współczynniki bezpieczeństwa są rozumiane jako stosunki największych naprężeń występujących we włóknach zbrojenia w momencie zniszczenia oraz przy ciśnieniu pracy. Oznacza to, że udział osnowy polimerowej w przenoszeniu obciążeń jest pomijany. Zróżnicowanie wartości współczynników bezpieczeństwa w zależności od rodzaju zastosowanych włókien wynika z różnic w przebiegu procesów rozwoju uszkodzeń. Uszkodzenia rozwijają się w materiale pod wpływem działających obciążeń. Głównie chodzi tu o odkształcenie inicjacji uszkodzeń, powstawania mikropęknięć na granicy międzyfazowej włókno–spoiwo w obszarach o niekorzystnej orientacji włókien. Ponadto włókna węglowe są bardziej odporne na niekorzystne oddziaływanie środowiska oraz charakteryzują się bardzo wysoką wytrzymałością zmęczeniową.

#### 4. PODSUMOWANIE

W fazie projektowania zbiorników kompozytowych wykorzystywane są również metody analityczne w tym MES wspomagane komputerowo. Jednak w przeciwieństwie do zbiorników metalowych nie ma jednej powszechnie uznanej metody analitycznej do oceny nośności zbiorników kompozytowych ze względu na znaczny błąd jakim opatrzony jest wynik obliczeń. Jednak standardy dot. zbiorników wodorowych ostrożnie dopuszczają dokumentację obliczeniową (patrz tabela 1). Dlatego decydującym kryterium dopuszczenia konstrukcji zbiornika kompozytowego do użytkowania jest pozytywne zaliczenie programu badań homologacyjnych, w zależności od przeznaczenia zbiornika. Z tym aspektem jest też związana odmienna procedura wytworzenia prototypu. Dodatkowym argumentem jest znaczny koszt i czasochłonność przeprowadzenia badań homologacyjnych (nawet do dwóch lat).

Zespół Instytutu współtworzył technologię typoszeregu zbiorników ciśnieniowych na

sprężony gaz ziemny CNG, która została wdrożona w przemyśle krajowym. Aktualnie bierze udział w europejskim konsorcjum badawczym, które opracowuje skuteczne metody gromadzenia wodoru do zasilania ogniw paliwowych w samochodach. Uczestnikami tego konsorcjum są między innymi: Fiat, INASMET, FZK Karlsruhe, DaimlerChrysler, BMW, Magna Steyr, BAM, JRC, Messer, Volvo, Ford, IVW, MAN [18].

#### **SPIS LITERATURY:**

- 1 Draft ECE Compressed Gaseous Hydrogen Regulation, Revision 12b -
- 2 PN-EN 12245:2002 (U) Butle do gazów- Butle wykonane z kompozytów całkowicie wzmocnionych
- 3 PN-EN 12257:2002 (U) Butle do gazów – Butle z kompozytów bez szwu wzmocnione obwodowo
- 4 PN-EN 12805 :2005 Części składowe instalacji zasilania pojazdów samochodowych skroplonym gazem węglowodorowym (LPG) – Zbiorniki
- 5 PN-EN 13923:2006 (U) Zbiorniki ciśnieniowe pokrywane włóknem szklanym (FRP)- Materiały,projektowanie, wytwarzanie i badanie
- 6 PN-EN 14427:2004 (U)/A1:2006 (U)Butle do gazów – Wykonane z kompozytów całkowicie wzmocnione butle wielokrotnego napełniania (LPG)-Projektowanie i konstrukcja
- 7 PN-EN 14763:2005 (U) Butle do gazów – Wykonane z kompozytów butle wielokrotnego napełniania dla gazów ciekłych ropopochodnych (LPG)- Procedura sprawdzania przed, w czasie i po napełnieniu
- 8 PN-EN 14767:2006 (U) Butle do gazów – Wykonane z kompozytów butle wielokrotnego napełniania dla gazów ciekłych ropopochodnych (LPG) – Badania okresowe
- 9 PN-EN ISO 11114-1 :2001 Butle do gazów – Zgodność materiału butli i zaworu z gazem zawartym w butli Część 1: Materiały metalowe
- 10 PN-EN ISO 11114-2 :2002 Butle do gazów – Zgodność materiału butli i zaworu z gazem zawartym w butli Część 2: Materiały niemetaliczne
- 11 PN-EN ISO 11114-3:2001 Butle do gazów – Zgodność materiału butli i zaworu z gazem zawartym w butli Część 3: Badanie samozapalenia w atmosferze tlenu
- 12 PN-EN ISO 11114-4 :2005 (U) Butle do gazów – Zgodność materiału butli i zaworu z gazem zawartym w butli Część 4: Metody badań i selekcji materiałów metalowych na kruchość wodorową
- 13 ISO 11119-1:2002 Gas cylinders of composite construction – Specification and test methods - Part 1: Hoop wrapped composite gas cylinders
- 14 ISO 11119-2:2002 Gas cylinders of composite construction – Specification and test methods-Part 2:Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders with load-sharing metal liners
- 15 ISO 11119-3:2002 Gas cylinders of composite construction – Specification and test methods-Part 2:Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders with non load-sharing metallic or non-metallic liners
- 16 PN-EN ISO 11439:2003 Butle do gazów – wysokociśnieniowe butle do gazu ziemnego stosowane jako zbiorniki paliwa pojazdów samochodowych
- 17 PN-EN ISO 11623:2002(U) Butle do gazów -okresowa kontrola i badania butli do gazów wykonanych z kompozytów
- 18 <http://www.storhy.net/>