

WOJCIECH BŁĄŻEJEWSKI\*

METODYKA DOBORU STRUKTURY KOMPOZYTOWEGO  
OPLOTU NOŚNEGO ZBIORNIKÓW WYTWARZANYCH  
METODĄ NAWIJANIAMETHODOLOGY OF CHOOSING THE WINDING  
STRUCTURES OF COMPOSITE WALL OF PRESSURE  
VESSELS MADE BY FILAMENT WINDING METHOD

## Streszczenie

Wyznaczano eksperymentalnie optymalną strukturę ścianki nośnej zbiorników kompozytowych. W celach porównawczych zostały wykonane zbiorniki ciśnieniowe o różnej strukturze nawijania. Pozostałe parametry (takie jak kąt, grubość ścianki, udział żywicy i włókien szklanych) pozostały te same. Następnie zostały przeprowadzone badania ciśnieniowe. Odształcenia mierzone na linii zgrupowania przeplotów struktury Nr 1 były około dwa razy mniejsze od odształceń mierzonych w obszarach pomiędzy liniami.

*Słowa kluczowe: metoda tablicowa, struktury nawijania, kompozytowe zbiorniki ciśnieniowe*

## Abstract

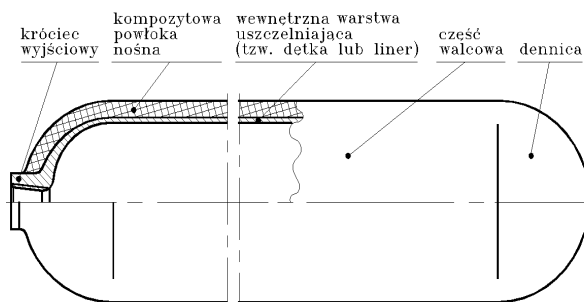
The optimal structure of composite wall of pressure vessels was experimentally determined. For that purpose the comparative composite pressure vessel with different winding structures (fig. 2) were made. Other winding parameters (like angle, composite wall thickness, content of resin and glass fibers) were the same. Pressure vessels were burst tested. The smallest deformations (strains) for structure no. 1 were registered in an area of interleaving lines, whereas the biggest ones were between these lines. For other structures and the same pressure values such extreme strain field distributions were not observed.

*Keywords: matrix method, filament winding structures, composite pressure vessels*

\* Dr inż. Wojciech Błażejowski, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska.

## 1. Wprowadzenie

W grupie zbiorników wysokociśnieniowych (ciśnienia pracy powyżej 140 barów [1]) występują konstrukcje o szczególnych parametrach eksploatacyjnych, które mogą spełnić jedynie tzw. zbiorniki kompozytowe, rys. 1. Wysokie parametry eksploatacyjne w konstrukcjach kompozytowych są zapewnione przez zastosowania wysoko wytrzymałych włókien (np. włókna węglowe) ułożonych w sposób uporządkowany i zaprogramowany zgodnie z występującymi obciążeniami. Aktualnie na rynku można spotkać około 700 rodzajów handlowych, gazowych zbiorników kompozytowych, różniących się zastosowaniem, konstrukcją, w tym strukturą oplotu nośnego i technologią wykonania. Jest to związane przede wszystkim z dynamicznym rozwojem na świecie i masowym wykorzystaniem wysoko sprężonych paliw gazowych do zasilania silników pojazdów. Także z tej obszernej grupy gazowych zbiorników kompozytowych, obarczonych najwyższymi wymaganiami są właśnie zbiorniki przeznaczone do magazynowania sprężonego gazu ziemnego CNG (Compressed Natural Gas, ciśnienia pracy 200 barów) i sprężonego wodoru (ciśnienia pracy do 350 barów) w pojazdach [2]. Zbiorniki kompozytowe w porównaniu do stalowych charakteryzuje duża różnica ciśnień pracy i niszczących oraz muszą spełnić wiele forsownych wymogów. Jest to związana głównie z bezpieczeństwem eksploatacji tych konstrukcji lub raczej z brakiem ogólnie przyjętych procedur obliczeniowych ze względu na złożoną budowę. Ważnym parametrem eksploatacyjnym zbiorników jest masa odniesiona do objętości, np. dla zbiorników stalowych, tzw. typ CNG-1, wynosi około 1 l/kg a dla typu CNG-4 (pełny oplot i liner z tworzywa sztucznego) nawet 4 l/kg i więcej. To jest powód wypierania zbiorników stalowych z konstrukcji mobilnych (przenośnych, przewoźnych) przez zbiorniki kompozytowe. Obecnie planuje się wprowadzenie na rynek tzw. zbiorników nowej generacji, tzn. zbiorników kompozytowych przeznaczonych do magazynowania wodoru pod ciśnieniem pracy 700 barów i niszczącym powyżej 1645 barów (dla włókna węglowego). Budowa zbiornika nowej generacji jest związana z wykorzystaniem wysoko modułowych włókien węglowych na oplot nośny oraz wysokiej gęstości tworzyw sztucznych na tzw. liner zapewniający szczelność, np. poliamid. Oznacza to, że zbiornikiem nowej generacji będzie konstrukcja typ 4. Obecne konstrukcje prototypowe charakteryzują się współczynnikiem objętościowym nie przekraczając 2 l/kg. Zastosowanie innych włókien niż węglowych, np. aramidowych, bazaltowych, itp. A zwłaszcza szklanych, jest wykluczone, chociaż normy dopuszczają ten materiał. Ciśnienia niszczące dla takiej konstrukcji zbiornika przekraczają 2550 barów [2]. Dodatkowo masa włókna szklanego jest dwukrotnie wyż-



Rys. 1. Budowa zbiornika kompozytowego

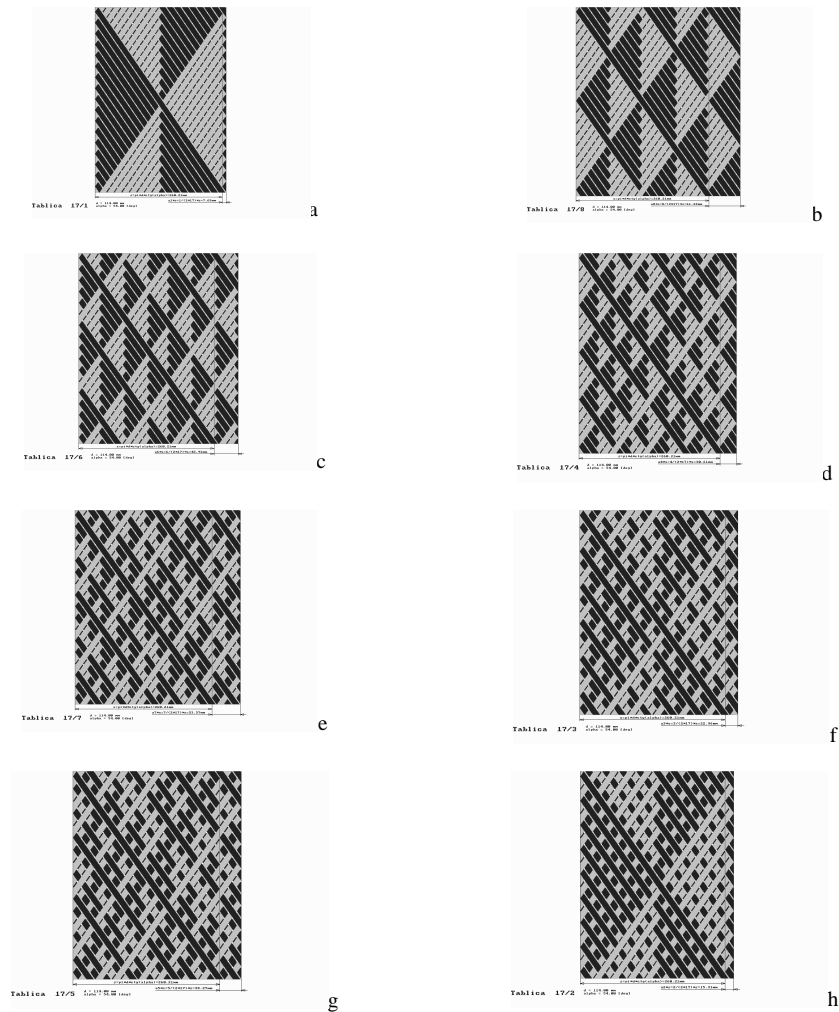
Fig. 1. Construction of composite vessel

sza od włókna węglowego. Wykluczony jest także typ 3 zbiornika, ponieważ linery wykonane z metalu nie wytrzymują wymagań zmęczeniowych. Zbiorniki typu CNG 1, 2 i 3, zostały już całkowicie rozpoznane (projektowanie, technologia, wybór materiałów, badania, itp.), dla producentów renomowanych firm nie stanowią tajemnic. Można także znaleźć doniesienia o nowych firmach, które próbują wejść na rynek ze swoimi nowymi konstrukcjami typu CNG, jednak wbrew pozorom zbiornik kompozytowy kumuluje w sobie ogromną wiedzę konstrukcyjną i technologiczną. Bardzo wiele rozwiązań zostało opatentowanych i zastrzeżonych. Są to kilkudziesięcioletnie lata pracy konstruktorów i technologów obecnych dostawców zbiorników kompozytowych. Teraz ich walka o rynek polega na ulepszeniu swoich technologii, głównie w celu redukcji ceny. Są to np. konstrukcje hybrydowe, w celu zastąpienia częściowego drogich włókien węglowych włóknami nawet ponad dziesięciokrotnie tańszymi, np. szklanymi, lub wyprowadzenie króćca wyjściowego w części cylindrycznej w celu lepszego wykorzystania przestrzeni w pojeździe, lub użycie techniki tzw. nawijania pierścieniowego, które jest wydajniejsze i pozwala uzyskać lepszy materiał kompozytowy, itp. Należy dodać, iż obecnie rynek na pojedyncze zbiorniki jest bardzo wąski. Zbiorniki zamawiane są jako całe pakiety, połączone w zestawy na ramie z pokrywą ochronną i z homologacją na całość, tak aby np. producent autobusów zasilanych CNG mógł cały zastaw zamontować na dachu, lub producent auta potrzebuje pakietu zbiorników do jak najlepszego wypełnienia wnęki w podwoziu.

Przeniesienie doświadczeń projektowych i technologicznych z konstrukcji CNG czy wodorowych do 350 barów na zbiorniki wodorowe 700 barów nie sprawdza się, efekt skali nie działa. Pogrubianie ścianki oplotu nośnego nie oznacza zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej i zwiększenia ciśnień niszczących w sposób liniowy. Przy tak dużych ciśnieniach zaczynają pojawiać się nowe problemy, inne mechanizmy destrukcji materiału kompozytowego i linera. Zespoły badawcze producentów zbiorników stosują najlepsze materiały i sprawdzoną technologię, mimo to zbiornika nowej generacji typu 4 jeszcze na rynku nie ma. Natomiast obiecujące prototypy takich gigantów jak Dynetek, Quantum, Ulit, Faber, [5], już istnieją. Szybkie wprowadzenie na rynek zbiornika nowej generacji jest związane z odkryciem jeszcze lepszego materiału, lub dalsze poszukiwania rewolucyjnych technologii, np. zastosowanie syciw termoplastycznych, których użycie według obecnej technologii w nawijaniu krzyżowym jest wręcz niemożliwe, jednak próby wciąż trwają.

**Niniejsza praca dotyczy zagadnień optymalizacji parametrów nawijania w celu uzyskania struktury oplotu nośnego, w której będzie zapewniona najlepsza praca wiązek włókien wzmacniających.** Poszukuje się odpowiedzi na pytanie jak dobrać rozmieszczenie wiązek i przeplotów pomiędzy nimi aby uzyskać optymalną pracę oplotu nośnego zbiornika? Która ze struktur nawijanych przedstawionych na rys. 2 jest najlepsza do użycia na oplot nośny zbiornika? Duże znaczenie przy osiągnięciu optymalnej struktury oplotu nośnego mają także prawidłowe warunki formowania materiału kompozytowego, tzn. przestrzeganie reżimów utwardzania, pobrana preparacja włókna, itp., w tym drobne usprawnienia w technologii, np. wprowadzenie drgań w celu lepszego ułożenia się włókien na linerze, nawijanie z linerem pod kontrolowanym ciśnieniem wewnętrznym, zmiennym wraz ze wzrostem grubości ścianki nośnej, w celu zapobiegnięcia zapadaniu się linera w czasie nawijania, użycie próżni w czasie nawijania w celu zmniejszenia tzw. pustek w kompozycie, itd. Konstrukcje zbiornika nowej generacji komplikuje problem tzw. bariery, przenikania wodoru przez ściankę zbiornika a właściwie linera, jednak ten problem nie jest przedmiotem prac badawczych autora.

## 2. Generowanie struktur nawijanych w ramach grupy



Rys. 2. Osiem struktur nawijanych, które wygenerowano dla 17 wiązek

Fig. 2. Eight different winding structures, which were generated from 17 beams

Na rys. 2 przedstawiono wszystkie osiem struktur nawijania z grupy dla 17 wiązek na obwodzie [3]. Algorytm komercyjnych oprogramowań komputerowych, wspomagających projektowanie i wytwarzanie elementów nawijanych nie ma możliwości przedstawienia wszystkich możliwych do wykonania struktur z grupy, ponieważ jest nastawiony na przemysł, tzn. chodzi o wygenerowanie kilku struktur, jak najszybsze ich podanie graficzne oraz nawinięcie. W powszechnie przyjętym algorytmie do nawinięcia zbiornika podaje się:

kąt nawijania, szerokość wiązki, gabaryty linera (średnica, geometria dennic oraz najważniejsze długość linera). Program generuje tabelę obrazków oraz w ostatniej kolumnie dokładność wykonania. Operator programu ma za zadanie tylko wybrać obrazek, który jego zdaniem jest najlepszy. Jednak gdyby w tym momencie wprowadzić zmienną, zmieniając samą długością linera w granicach  $\frac{1}{2}$  skoku nawijania, może się okazać, że wybór struktur nawijania jest szerszy i może być korzystniejszy. W metodzie tablicowej [3], którą wykorzystuje autor do swoich badań nad optymalizacją struktur nawijanych, podejście do projektowania jest metodologiczne. Przy projektowaniu elementów nawijanych w pierwszej kolejności należy określić kąt nawijania, średnicę elementu i szerokość wiązki, a następnie dobrać strukturę nawijania. Dobrana optymalna struktura wzmocnienia wyznaczy długość elementu nawijanego, tzn. długość linera. W komercyjnych algorytmach często nie bierze się niektórych struktur pod uwagę, ponieważ liner jest już gotowy. Oznacza to, że najważniejsze to zaprojektowanie oplotu, projektowanie linera jest drugim etapem.

### 3. Badania własne struktur nawijanych

Przeprowadzono szerokie rozeznanie literaturowe nt. badań nad wpływem stopnia przepleceń w kompozytowych strukturach cylindrycznych na właściwości mechaniczne w szerokim znaczeniu (deformacje, wytrzymałość zmęczeniową i końcową, powstawanie i rozwój uszkodzeń, metody badawcze, modelowanie, itp.). Z dostępnej i dość ubogiej literatury na ten temat wynika [4], iż problem istnieje i jest znany, jednak proponowane oraz przeprowadzane badania nie dają odpowiedzi czy wyjaśnień na temat pracy wiązek wzmocniających w obciążanych elementach obrotowo symetrycznych, wykonanych metodą nawijania. Według autora przyczyną takiego stanu jest brak możliwości wykonania próbek w sposób metodologiczny, ponieważ korzystanie przez badaczy z nawijarek i oprogramowania komercyjnego uniemożliwia wykonanie próbek porównawczych (według liczby podziału obwodu rdzenia, np. 17 – rys. 2). Inna z przyczyn nie rozwiązywania problemu struktury to przyjęcie przez znawców tematu błędnego założenia, iż tzw. choinkowa struktura nawijania (rys. 2a) jest optymalna ze względów wytrzymałościowych. Równoznaczne nazwy struktury to rombowa, diamentowa, jodełkowa lub według autora [3] struktura *Nr 1*. Z badań przeprowadzonych przez autora wynika odwrotnie, jest to struktura najmniej korzystna ze względów wytrzymałościowych. Ze względów technologicznych wykonanie struktury choinkowej, *Nr 1* przy wytwarzaniu rury czy zbiornika jest bardzo wygodne, ponieważ wiązki układane są jedna za drugą, a w momencie zakończenia warstwy można przejść do następnej, nie widać błędu ułożenia pomiędzy kolejnymi warstwami, jeśli taki jest. Jednak w miejscu krzyżowania się wiązek (w miejscu tak charakterystycznej choinki, którą nazwano linią przepłotów) powstaje obszar, linia o odmiennych właściwościach od obszaru pomiędzy liniami przepłotów – rys. 2a. Obciążane rury czy zbiorniki o strukturze *Nr 1*, ulegają zniszczeniu właśnie w okolicach linii zgrupowania przepłotów i w miejscu położenia ostatniej lub pierwszej wiązki (charakterystyczny krzyż na środku struktury rys. 2a). W pracach [3 i 4] przedstawiono wyniki badań, które świadczą o ważności problemu doboru nawoju oraz o niekorzystnej pracy oplotu nośnego zbudowanego ze struktury *nr1*. Dotyczyły one następujących badań:

- badania ciśnieniowe zbiorników,
- badania rur na skręcanie,

- badania ciśnieniowe rur według różnego rozkładu naprężeń w ścianie rury (według sposobu II i III oraz pośrednich).

W wyniku badań ustalono:

- odkształcenia mierzone na linii zgrupowania przeplotów struktury *Nr 1* były około dwa razy mniejsze od odkształceń mierzonych w obszarach pomiędzy liniami. Żadna inna struktura z grupy nie miała tak dużych odkształceń jak struktura *Nr 1* pomiędzy liniami zgrupowania przeplotów oraz tak małych jak na liniach zgrupowania przeplotów.
- Struktury z tej samej grupy różnią się charakterem zniszczenia. W strukturach *Nr 1* zniszczenie następowało dokładnie na skrzyżowaniu linii zgrupowania przeplotów i linii kończącej nawijanie warstwy. Miejsce zniszczenia charakteryzuje się prostymi krawędziami, natomiast inne struktury, zwłaszcza w których brak wyraźnych linii zgrupowania przeplotów (szczególnie rys. 2 e, f, g, h), pękają na większej powierzchni, krawędzie rozerwania są poszarpane, sprawiają wrażenie rozwarstwionych.

#### 4. Podsumowanie

Dotychczas przebadano około 30 szt. zbiorników wykonanych według struktur przedstawionych na 2. Prowadzone badania i poszukiwania struktury optymalnej wydają się bezowocne, gdyż rozrzuty w badaniach niszczących zbiorników nawiniętych zgodnie ze strukturami podanymi na rys. 2 pokrywają się i mieszczą się w granicach błędu dla kompozytów nawijanych. Jednak po zwiększeniu liczności próbek, obróbka statystyczna wyników może podać optimum. Jak podano powyżej, kryterium odkształcenia powierzchni ścianki nośnej zbiornika oraz kryterium charakteru zniszczenia jednoznacznie wskazują niekorzystny charakter pracy struktur Nr1.

Praca finansowana z projektu badawczego nr N N508477534.

#### Literatura

- [1] Urząd Dozoru Technicznego, *Warunki techniczne dozoru technicznego. Urządzenia ciśnieniowe*, Zbiorniki transportowe DT-UC-90/ZP.
- [2] PN-EN ISO 11439, oraz Draft ECE Compressed Gaseous Hydrogen Regulation, Revision 12b. 12.10.03, Informal Group: Hydrogen/Fuel Cell Vehicles.
- [3] Błażejowski W., *Wpływ struktury nawijania włókna na wytrzymałość elementów walcowych wykonanych z kompozytu ES*. praca doktorska PWr. 1999.
- [4] Błażejowski W., *Struktury nawijania zbiorników wysokociśnieniowych, ocena współpracy włókien w kompozycie.*, XXIII SMECS, Jachranka 2008.
- [5] <http://www.storhy.net/>
- [6] <http://www.ingas.net/>