

Streszczenie

W dysertacji podjęto zagadnienie wpływu naciągu włókna oraz opracowania algorytmu doboru jego racjonalnej sekwencji i wartości w procesie nawijania wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych do gromadzenia wodoru. Chodziło zatem o to, by możliwie najlepiej wykorzystać właściwości wytrzymałościowe i zmniejszyć masę włókna bez obniżania wymagań w zakresie bezpieczeństwa zbiorników. Przyjęto, że naprężenia będące następstwem siły naciągu mogą pozytywnie wpływać na wytrzymałość badanego obiektu i powinny być wzięte pod uwagę w procesie projektowania zbiorników.

Prace rozpoczęto od części eksperymentalnej, co wymagało wytworzenia obiektu badań w postaci serii zbiorników trzeciej generacji z linerem stalowym i nawojem z włókna węglowego. Konieczne było też zapewnienia niezbędnych stanowisk badawczych i przeprowadzenie testów ciśnieniowych, których wyniki posłużyły do identyfikacji dwóch procedur modelowania siły naciągu włókna w procesie nawijania. W procesie wytwarzania zastosowano dwa naciągi włókna odpowiadające odpowiednio sile 3N oraz 80N. Niezależnie zbadano też liner bez oplotu. Quasi-statyczne testy ciśnieniowe umożliwiły pomiar odkształceń na powierzchni zbiornika w obszarze sprężystym.

Do zamodelowania sekwencji siły naciągu włókna wykorzystano dwa różne sposoby postępowania. Procedura pierwsza bazowała na uproszczonej dwuskalowej homogenizacji właściwości kompozytu i wykorzystywała pomiar udziału masowego głównych składników kompozytu, czyli włókna i żywicy w komórce elementarnej RVE, a pomijała analizę mikrostruktury i występujących w niej defektów. Ilustrowała zatem wyidealizowany kompozyt, który w rzeczywistości nie istnieje. Z kolei procedura druga wykorzystywała wyniki badań mikrostruktury oraz analizę statystyczną definiującą udziały i postaci włókna, żywicy i defektów w komórce RVE. Metoda umożliwiała budowę modelu materiału z uwzględnieniem różnych skal długości. Pozwalała w szczególności uwzględnić wpływ występujących w kompozycie niejednorodności (defekty, pustki). Procedura druga była zatem bliższa rzeczywistemu obiektowi, jednakże i tu pozostałe niedoskonałości (np. kieszenie żywiczne, zerwane włókna czy efekty nakładania kolejnej warstwy włókien) były pomijane.

Uzyskane modele materiału z obu procedur posłużyły następnie do symulacji zbiornika obciążonego ciśnieniem równym 70 MPa, czyli typowym dla zbiornika IV generacji do wodoru. Wyniki modelowania wykazały, iż struktura naciągu o sekwencji, w której najpierw zastosowano siłę 3N, a później siłę 80N jest korzystniejsza, ponieważ przy tej samej ilości włókna można obciążyć zbiornik większym ciśnieniem nominalnym.

Dodatkowo rozważono ograniczenia w zakresie możliwości pomiarów w kompozycie przy użyciu tensometrów, co może być powodem rozrzutów wartości odkształceń uzyskanych eksperymentalnie oraz otrzymanych w wyniku modelowania z użyciem procedur homogenizacyjnych.

W następstwie zrealizowanego programu badań wykazano, iż zastosowanie „programowanego” naciągu włókna w procesie nawijania zbiorników kompozytowych pozwala zwiększyć ciśnienie nominalne gromadzonego medium przy tej samej ilości włókna, co powoduje wzrost gęstości gromadzonej energii i pozytywne następstwa ekonomiczne. Zauważono też, iż rezultaty uzyskane w pracy dla kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych mogą być wykorzystane również w procesie wytwarzania wysokociśnieniowych rur kompozytowych, których rynek będzie narastał.

Tematyka rozprawy jest powiązana z kluczowym współczesnym zagadnieniem jakim jest potrzeba transformacji energetycznej i surowcowej światowej gospodarki, w tym z użyciem technologii wodorowych i wdrożeniem tzw. gospodarki wodorowej.

Abstract

The dissertation addressed the impact of fiber tension and the development of an algorithm for selecting its rational sequence and value in the winding process of high-pressure composite tanks for hydrogen storage. Thus, the idea was to make the best possible use of the strength properties and reduce the weight of the fiber without lowering the safety requirements of the tanks. It was assumed that the stresses resulting from the tension force could positively affect the strength of the object under study and should be taken into account in the vessel design process.

The work began with the experimental part, which required the production of a test object in the form of a series of third-generation tanks with steel liner and carbon fiber winding. It was also necessary to provide the necessary test benches and carry out pressure tests, the results of which were used to identify two procedures for modeling the fiber tension force in the winding process. Two fiber tensions corresponding to a force of 3 N and 80 N respectively were used in the manufacturing process. An unbraided liner was also tested independently. Quasi-static pressure tests made it possible to measure deformations on the surface of the container in the elastic region.

Two different procedures were used to model the fiber tensile force sequence. The first procedure was based on a simplified two-scale homogenization of composite properties and used a measurement of the mass proportion of the main components of the composite, namely the fiber and resin, in the RVE elementary cell, and ignored an analysis of the microstructure and the defects present in it. Thus, it illustrated an idealized composite that does not exist in reality. Procedure two, on the other hand, used the results of microstructure studies and statistical analysis defining the proportions and forms of fiber, resin and defects in the RVE cell. The method made it possible to build a model of the material taking into account different length scales. In particular, it allowed to take into account the influence of inhomogeneities (defects, voids) present in the composite. The second procedure was therefore closer to the real object, however, even here the remaining imperfections (e.g. resin pockets, broken fibers or the effects of applying another layer of fibers) were ignored.

The resulting material models from both procedures were then used to simulate a tank loaded with a pressure equal to 70 MPa, which is typical of a fourth-generation tank for hydrogen. The modeling results showed that a tension structure with a sequence in which a force of 3 N was applied first, followed by a force of 80 N, was more favorable, since the tank could be loaded with a higher nominal pressure for the same amount of fiber.

In addition, limitations in the ability to measure in the composite using strain gauges were considered, which may be the reason for the dispersion of strain values obtained experimentally and those obtained by modeling using homogenization procedures.

Following the implemented research program, it was shown that the use of "programmed" fiber tension in the winding process of composite vessels allows to increase the nominal pressure of the collected medium with the same amount of fiber, resulting in an increase in the density of the collected energy and positive economic consequences. It was also noted that the results obtained in the work for high-pressure composite tanks can also be used in the process of manufacturing high-pressure composite pipes, the market for which will grow.

The dissertation topics are related to the key contemporary issue of the need for Energy and raw material transformation of the global economy, including the use of hydrogen technologies and the implementation of the so-called hydrogen economy.