

Leon KUKIELKA, Krzysztof KUKIELKA, Katarzyna GELETA, Łukasz CĄKAŁA

KOMPUTEROWE MODELOWANIE I OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE ZBIORNIKÓW NA GAZ PŁYNNY LPG

Streszczenie

W artykule przedstawiono komputerowe modelowanie oraz wyniki obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych w programie ABAQUS zbiorników toroidalnych do magazynowania gazów ciekłych LPG, jako specjalne wyposażenie do zasilania pojazdów samochodowych. Określono stany naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w zbiorniku toroidalnym pełnym, który został poddany działaniu ciśnienia wewnętrznego o wartościach 2 MPa, 4 MPa, 6 MPa, 6,75 MPa.

WSTĘP

Celem artykułu jest analiza wytrzymałościowa zbiornika toroidalnego na gaz płynny LPG, przy pomocy programu ABAQUS. Pod nazwą ABAQUS kryje się seria programów służących do symulacji złożonych problemów inżynierskich, od stosunkowo prostej analizy liniowej do silnie nieliniowych zagadnień. ABAQUS bazuje na metodzie elementów skończonych.

W obliczeniach wytrzymałościowych i symulacyjnych zdarzeń wykorzystuje się Metodę Elementów Skończonych (MES). Polega ona na podzieleniu powierzchni badanego obiektu na wielokąty połączone ze sobą w punktach zwanych więzami, obliczaniu naprężeń działających na każdy element, a następnie scaleniu wyników obliczeń [1].

Charakterystykę zbiornika i ciśnienia panującego w zbiorniku opisuje się na podstawie symulacji, przy zadaniu odpowiednich obciążeń. Badania te ułatwiają analizę sytuacji wynikających ze wzrostem ciśnienia oraz sił, które działają na zbiornik. W konsekwencji dąży się do opracowania zbiornika o pożądanych cechach.

1. ANALIZA NUMERYCZNA ZBIORNIKA TOROIDALNEGO

Celem obliczeń było sprawdzenie metodą elementów skończonych (MES), czy wybrany zbiornik toroidalny spełnia wymagania techniczne określone jednolitymi przepisami dotyczącymi homologacji specjalnego wyposażenia pojazdów samochodowych napędzanych gazami ciekłymi określonymi w Regulaminie Nr 67, Rewizja 1 zawierająca 01 serię poprawek do Regulaminu. W tym celu określono stany naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia w zbiorniku toroidalnym, który poddany został obciążeniu o ciśnieniu wewnętrznym o wartościach: 2 MPa, 4 MPa, 6 MPa, 6,75 MPa.

Zbiornik obciążano ciśnieniem wewnętrznym od 2 MPa do wartości 6,75 MPa, obliczonej na podstawie regulaminu ze wzoru $\left(\frac{9}{4}\right) \cdot p_h$ [MPa], gdzie: $p_h = 3$ [MPa] – ciśnienie próby hydraulicznej, zatem $\left(\frac{9}{4}\right) \cdot 3$ [MPa] = 6,25 MPa.

Dla każdej wartości ciśnienia wewnętrznego obliczano wartości naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w zbiorniku.

Obliczenia MES zbiornika prowadzone były techniką przyrostową (krok-po-kroku), wykorzystując uaktualniony opis Lagrange'a, z uwzględnieniem nieliniowego modelu materiału sprężystego, z nieliniowym umocnieniem. Do obliczeń stanów naprężeń, odkształceń i przemieszczeń wykorzystywano moduły obliczeniowe systemu ABAQUS.

W celu interpretacji wyników obliczeń zbiorników zastosowano następujące kryteria:

- przy ciśnieniu 2 MPa maksymalne naprężenia zredukowane nie mogą być większe od początkowej granicy plastyczności według normy, tj. $R_e = 310$ MPa dla stali P310NB,
- przy ciśnieniach mniejszych lub równych $\left(\frac{9}{4}\right) \cdot p_h$ [MPa], tj. 6,75 MPa, maksymalne naprężenia zredukowane nie mogą być większe od minimalnych naprężeń na rozrywanie tj. $R_e^d = 360$ MPa.

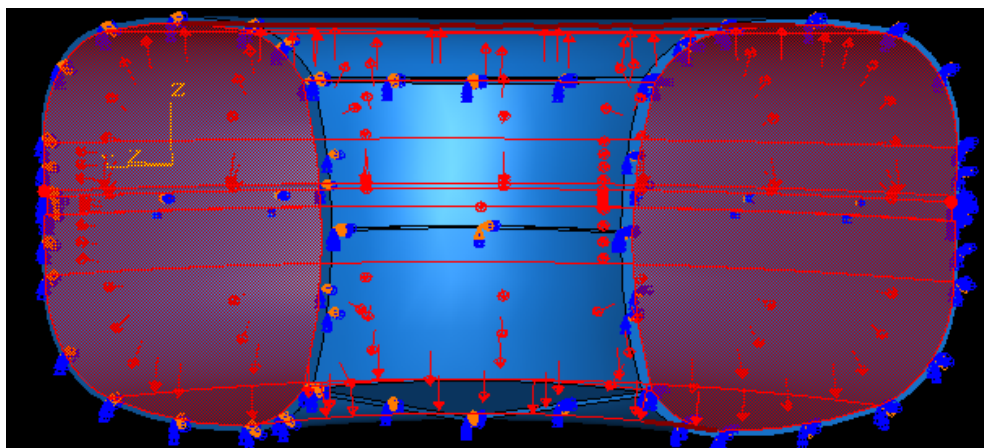
Model MES zbiornika toroidalnego w środowisku ABAQUS

Do obliczeń wytrzymałościowych zbiornika wykorzystano metodę elementów skończonych oraz program komputerowy ABAQUS. Model numeryczny MES zbiornika wykonano na podstawie dokumentacji technicznej. Ze względu na podwójną symetrię zbiornika rozpartczono jego $\frac{1}{4}$ część (rys. 1). Analizowano model przestrzenny (3D) w programie ABAQUS z wykorzystaniem $N_e = 333697$ elementów skończonych typu tetragonalnych (rys. 2).

Model zbiornika obciążono ciśnieniem wewnętrznym i podparto, unieruchamiając jego miejsce łączenia dennicy górnej z dennicą dolną.

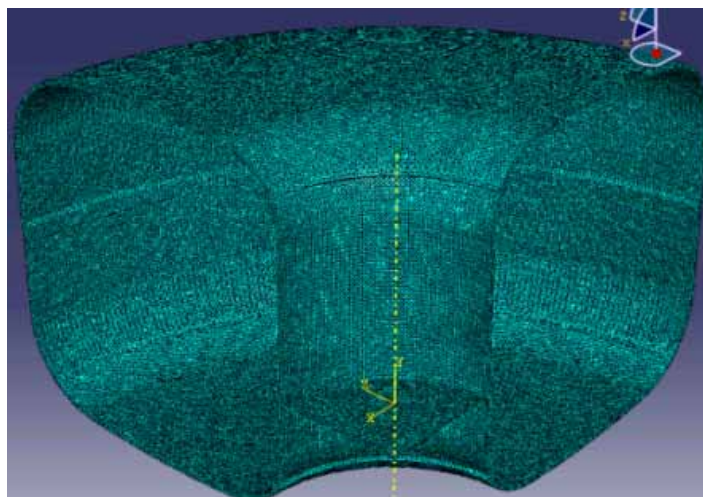
Analizowany zbiornik wykonany był z materiału:

- stal P310NB, dla której (zgodnie z normą EN 10120) minimalna granica plastyczności wynosi $R_e = 310$ MPa, granica dolna wytrzymałości na rozrywanie wynosi $R_m^d = 460$ MPa, zaś górna $R_m^g = 550$ MPa.
- współczynnik Poissona wyniósł $\nu = 0.28$.



Rys. 1. Przestrzenny model geometryczny zbiornika w programie ABAQUS z widocznymi warunkami brzegowymi

Źródło: Opracowanie własne.

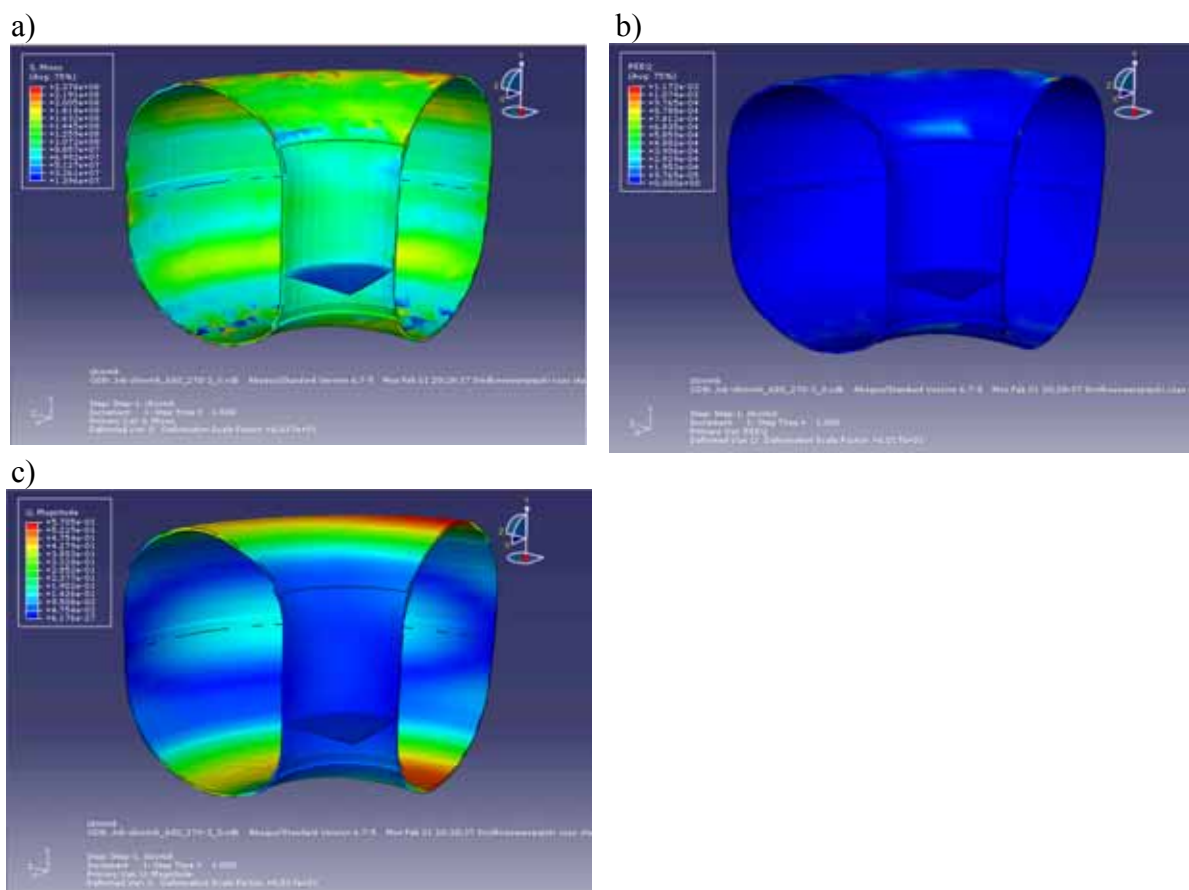


Rys. 2. Dyskretny model zbiornika w programie ABAQUS (podział elementów skończonych $N_e = 333697$).

Źródło: Opracowanie własne.

Wyniki symulacji

Wyniki obliczeń naprężeń, przemieszczeń i odkształceń dla ciśnienia 2 MPa przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Wyniki symulacji przy ciśnieniu 2 MPa: a) naprężenia zredukowane; b) odkształcenia zredukowane; c) przemieszczenia wypadkowe

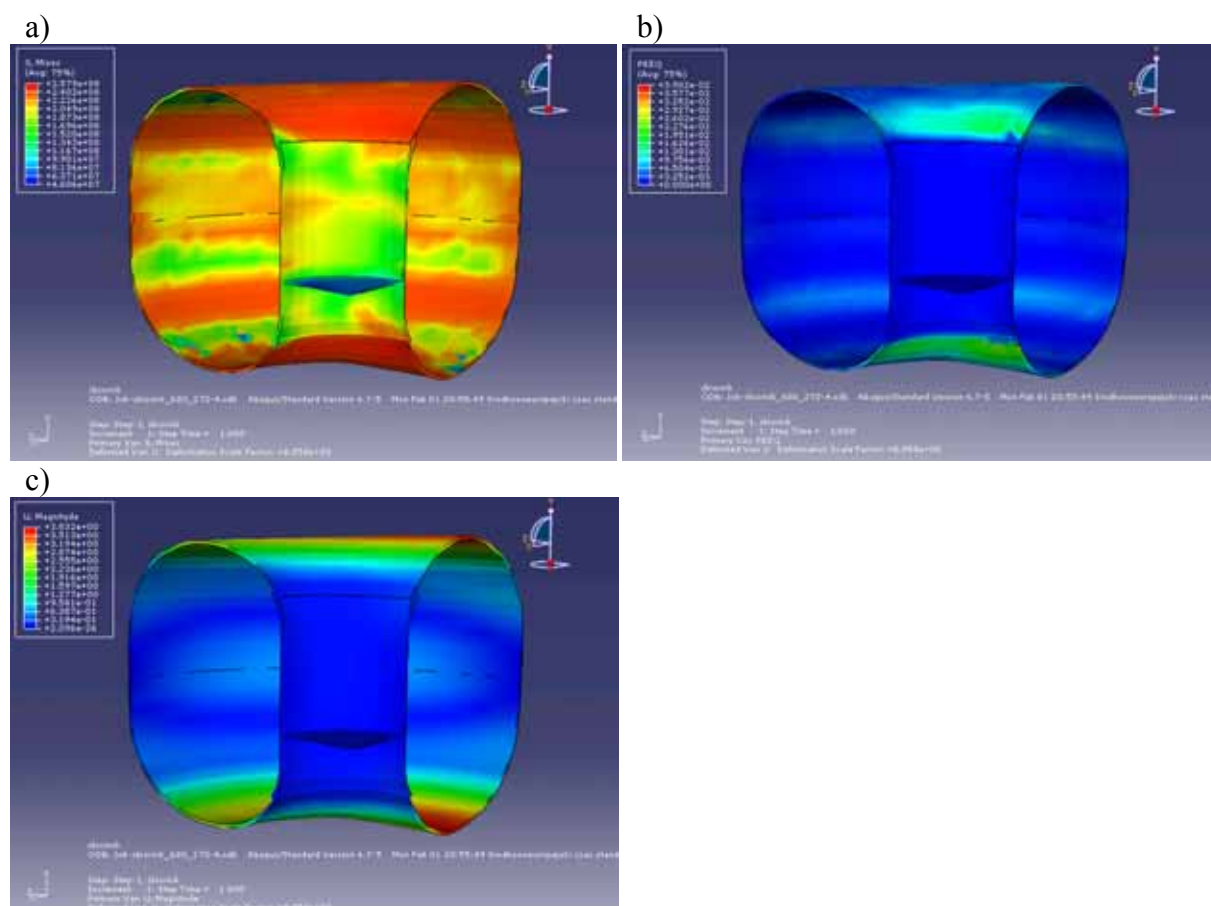
Źródło: Opracowanie własne.

Przy ciśnieniu 2 MPa maksymalne naprężenia zredukowane wyniosły $\sigma_z = 237$ [MPa] (rys. 3a). Największe naprężenia były zlokalizowane na łukach dennic od strony zewnętrznej zbiornika oraz w pobliżu rury (kielicha) od strony wewnętrznej zbiornika. Pozostałe części dennic miały naprężenia wynoszące około 140 MPa. Naprężenia w kielichu wyniosły około 120 MPa w górnej części oraz około 75 MPa w części środkowej. Przeszyczenia wypadkowe środkowej części każdej dennicy wyniosły 0,571 mm (rys. 3c). Pojawiły się niewielkie odkształcenia głównie na łukach dennic w pobliżu kielicha wynoszące 0,1% (rys. 3b).

Przy ciśnieniu 4,0 MPa maksymalne naprężenia zredukowane wyniosło 257,9 MPa (rys. 4a). Maksymalne przeszczenia wypadkowe były zlokalizowane w środkowej części dennic osiągnęło wartość 3,83 mm (rys. 4c). Maksymalne odkształcenia zredukowane było równe 0,039 (rys. 4b), głównie w środkowej części od strony wewnętrznej oraz na łukach dennic od strony wewnętrznej.

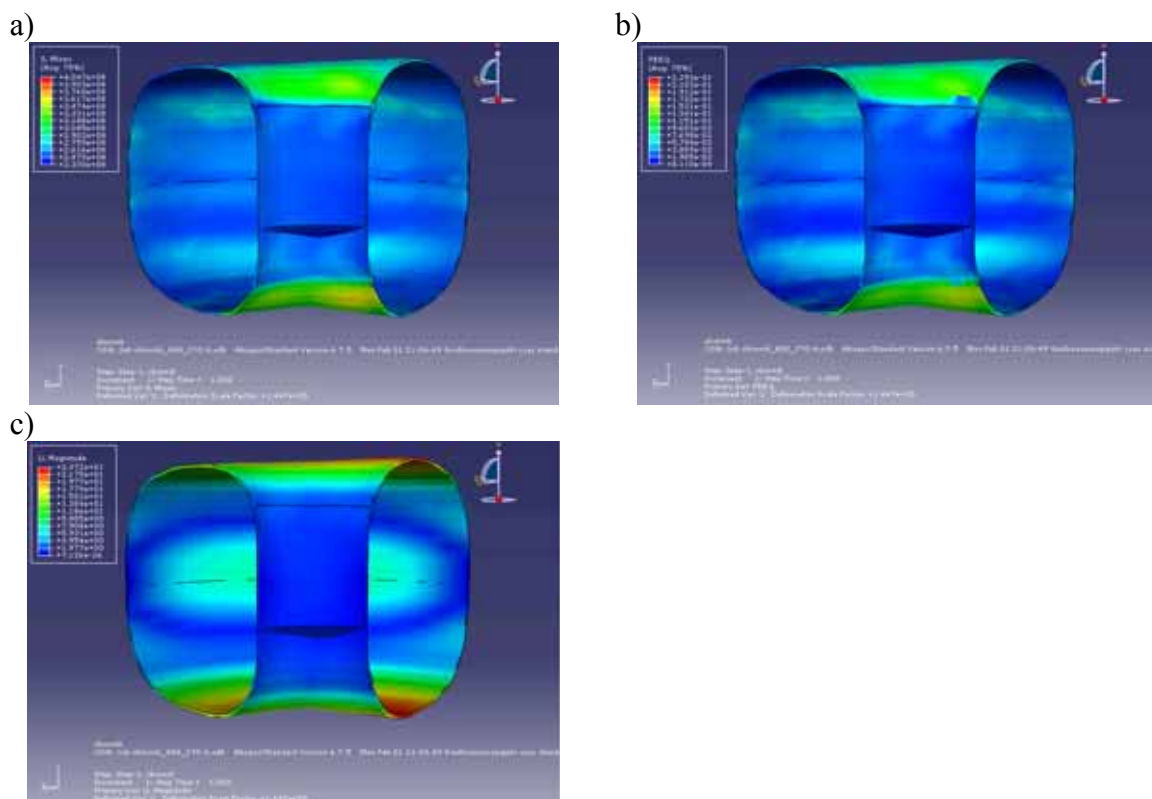
Przy ciśnieniu 6 MPa maksymalne naprężenia zredukowane osiągnęły wartość 404,7 MPa (rys. 5a) na łukach dennic. Przeszczenia wypadkowe środkowej części dennic wyniosły 23,72 mm (rys. 5c), a maksymalne odkształcenia zredukowane – 0,23 (rys. 5b).

Przy ciśnieniu 6,75 MPa maksymalne naprężenia zredukowane osiągnęły wartość 423,5 MPa (rys. 6a). Nastąpił wzrost naprężeń w górnej części kielicha na łukach do 370 MPa. Przeszczenia maksymalne wyniosły 35,26 mm (rys. 6c). Maksymalne odkształcenia zredukowane wyniosły 0,34 (rys. 6b). Stan naprężeń w zbiorniku był mniejszy od dopuszczalnych R_m^d .



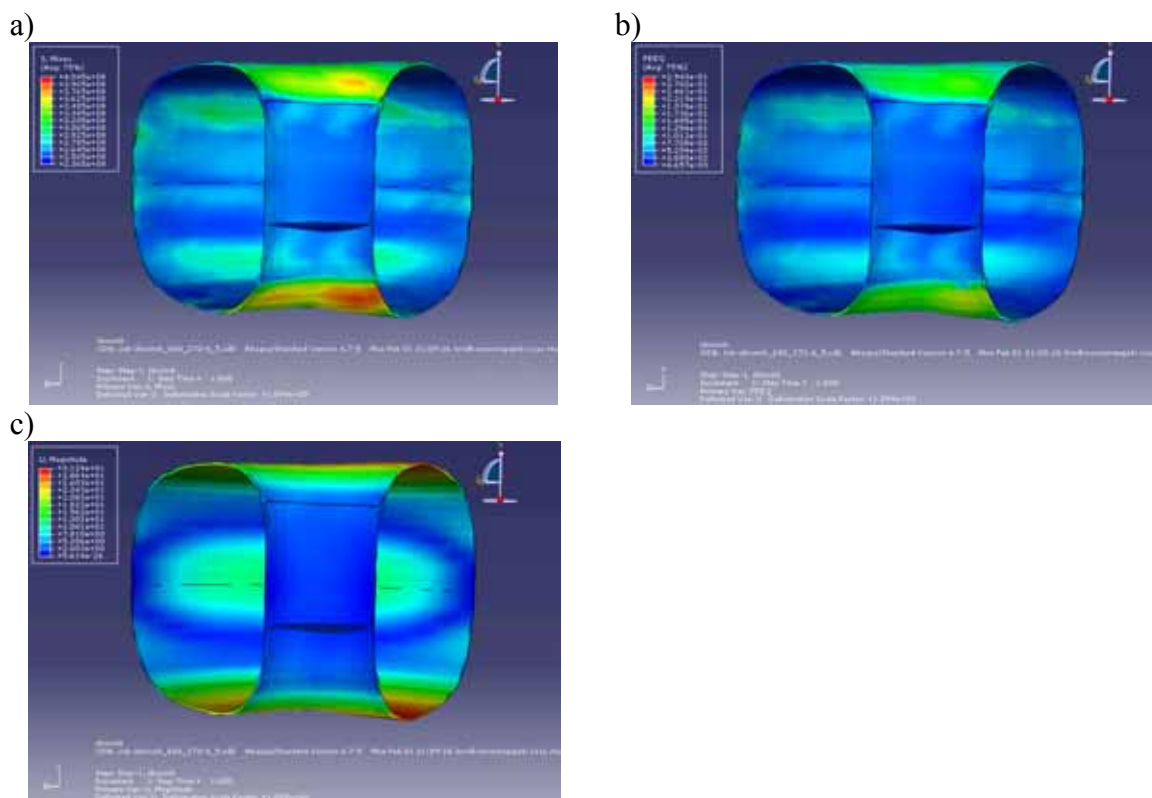
Rys. 4. Wyniki symulacji przy ciśnieniu 4 MPa: a) naprężenia zredukowane; b) odkształcenia zredukowane; c) przeszczenia wypadkowe

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 5. Wyniki symulacji przy ciśnieniu 6 MPa: a) naprężenia zredukowane; b) odkształcenia zredukowane; c) przemieszczenia wypadkowe

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 6. Wyniki symulacji przy ciśnieniu 6,75 MPa: a) naprężenia zredukowane; b) odkształcenia zredukowane; c) przemieszczenia wypadkowe

Źródło: Opracowanie własne.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone analizy wytrzymałościowe wykazały, że w zbiorniku najbardziej narażonymi na uszkodzenia elementami są miejsca łączenia dennicy górnej i dolnej oraz powierzchnie środkowe dennicy górnej i dolnej (wartość naprężeń i odkształceń przemieszczeń w tych miejscach była największa).

Wyniki obliczeń naprężeń zredukowanych, odkształceń zredukowanych i przemieszczeń wypadkowych w wybranym zbiorniku obciążonym ciśnieniem 2 MPa, 4 MPa, 6 MPa i 6,75 MPa zestawiono w tabeli 1.

Obliczone stany naprężeń zbiornika obciążonego ciśnieniem 2 MPa są mniejsze od minimalnej początkowej granicy plastyczności równej $R_e = 310$ MPa, natomiast ciśnieniem mniejszym lub równym 6,75 MPa – są zawsze mniejsze od minimalnych naprężeń na rozrywanie, tj. $R_e^d = 460$ MPa.

Komputerowe wspomaganie projektowania, poprawia jakość pracy inżyniera i konstruktora. System CAD/MES znacznie skraca czas projektowania nowego urządzenia, a w konsekwencji pozwala zmniejszyć również koszty projektu. Komputerowe wspomaganie projektowania pozwala znacznie szybciej stworzyć optymalne urządzenie, bez potrzeby budowania prototypów [3].

Tab. 1. Zestawienie wyników obliczeń

Lp.	Ciśnienie wewnętrzne [MPa]	Wyniki obliczeń		
		Naprężenia zredukowane [MPa]	Odształcenia zredukowane [-]	Przemieszczenia wypadkowe [mm]
1.	2	237	0,001	0,57
2.	4	257,9	0,04	3,83
3.	6	404,7	0,23	23,72
4.	6,75	423,5	0,34	35,26

Źródło: Opracowanie własne.

COMPUTER MODELING AND STRENGTH CALCULATIONS OF THE TANKS FOR LIQUEFIED PETROLEUM GAS

Abstract

In the article shows the computer modeling and numerical results of a calculation method of finite elements in ABAQUS toroidal tanks for storage of LPG, which is special equipment of motor vehicles fuelled with liquid gases. Determinate the stains of strains and stresses in the toroidal tank full, which has been subjected to internal pressure values 2 MPa, 4 MPa, 6 MPa, 6,75 MPa.

BIBLIOGRAFIA

1. Cąkała Ł.: *Modelowanie, analiza numeryczna i optymalizacja zbiornika toroidalnego na gaz płynny LPG*, praca magisterska, Koszalin, 2011.
2. Gierszewska M., *Metoda elementu skończonego wprowadzenie Finite Element Method (FEM)*, WNT, Warszawa, 2005.
3. Patyk R., Gryglicki R., Kukielka L.: *Analiza numeryczna procesu kształtowania gwintu metrycznego przy użyciu programu ABAQUS i ANSYS*, VII Słupskie Forum Motoryzacyjno-Drogowe, Słupsk, 2004.

4. Plichta J., Plichta S.: *Techniki komputerowe w inżynierii produkcji*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2006.
5. Program Abaqus, dok. elekt.: <http://www.icm.edu.pl/kdm/Abaqus>.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Leon Kukielka** – Politechnika Koszalińska

dr inż. **Krzysztof Kukielka** – Politechnika Koszalińska

mgr inż. **Katarzyna Geleta** – Politechnika Koszalińska

mgr inż. **Łukasz Cąkała** – Politechnika Koszalińska