

prof. dr hab. inż. Jerzy Ziółko\*  
dr inż. Tomasz Heizig\*\*

# Badania doświadczalne stalowych powłok walcowych obciążonych ciśnieniem zewnętrznym

*Experimental research of steel cylindrical shells subjected to external pressure*

Cienkościenne, stalowe powłoki walcowe stanowią główne elementy konstrukcji inżynierskich, takich jak zbiorniki, silosy, kominy i rurociągi. Charakteryzują się one wysokim wskaźnikiem  $r/t$ , gdzie  $r$  jest promieniem powłoki,  $t$  – grubością ścianki. Specyficzna geometria powoduje, że konstrukcje tego typu są szczególnie wrażliwe na ciśnienie zewnętrzne oraz imperfekcje geometryczne i mogą stracić stateczność przy względnie małej wartości obwodowych naprężeń ścisających. Silos i zbiornik uszkodzony wskutek działania podciśnienia przedstawiają fotografie 1 i 2.



Fot. 1. Silos uszkodzony w wyniku działania podciśnienia (Fot. T. Heizig)



Fot. 2. Zbiornik uszkodzony w wyniku działania podciśnienia (Fot. J. Ziółko)

Zgodnie z normą PN-EN 1993-1-6 [1] stan graniczny niestateczności powłoki walcowej określa się na podstawie:

- podejścia bezpośredniego (na podstawie stanu naprężenia);
- analizy fizycznie nieliniowej (MNA) i liniowej analizy bifurkacyjnej (LBA);
- geometrycznie i fizycznie nieliniowej analizy numerycznej z imperfekcjami (GMNIA).

Wyniki analiz numerycznych [2], [3] wykazują, że istnieją znaczne różnice pomiędzy wartościami obciążeń wyobczeniowych uzyskiwanymi na podstawie podejścia bezpośredniego i globalnych analiz numerycznych GMNIA. Badania przeprowadzone w Katedrze Konstrukcji Metalowych i Zarządzania

w Budownictwie Politechniki Gdańskiej miały na celu zweryfikowanie wytycznych normowych w tym zakresie i uzupełnienie istniejącej bazy wyników badań powłok walcowych obciążonych ciśnieniem zewnętrznym z uwzględnieniem początkowych imperfekcji geometrycznych badanych modeli.

## Modele doświadczalne

Badania obejmowały 3 grupy modeli: G1; G2 i G3. Wszystkie modele miały taką samą nominalną średnicę wewnętrzną  $d = 200$  mm oraz nominalną grubość ścianki  $t = 0,4$  mm. Wysokość modeli była zmienna i wynosiła:

- 600 mm – modele z grupy G1;
- 800 mm – modele z grupy G2;
- 980 mm – modele z grupy G3.

Charakterystykę modeli doświadczalnych przedstawiono w tabeli. Wszystkie modele wykonano z jednego arkusza blachy, którego brzegi po wygięciu arkusza zostały połączone za pomocą jednej, południkowej spoiny czołowej wykonanej za pomocą spawarki plazmowej. Każdy model przed rozpoczęciem badań pokryto warstwą farby matującej, co istotnie przyczyniło się do polepszenia jakości otrzymywanych pomiarów. W celu wyznaczenia charakterystyk wytrzymałościowych materiału, z jakiego zostały wykonane modele doświadczalne, prze-

## Charakterystyki modeli doświadczalnych

Grupa	Liczba [szt.]	Wysokość $l$ [mm]	Promień $r$ [mm]	Grubość $t$ [mm]	$l/r$	$r/t$	Stal
G1	13	600	100	0,4	6,0	250	1,4016*
G2	15	800	100	0,4	8,0	250	1,4016*
G3	26	980	100	0,4	9,8	250	1,4016*

\* oznaczenie wg DIN EN 10130

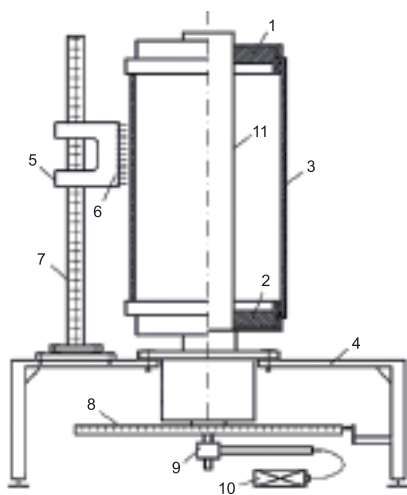
\* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

\*\* Politechnika Gdańska

proawdzono badania wytrzymałościowe. Grubość każdej próbki, zmierzona przed przystąpieniem do badań niszczących, wynosiła od 0,397 do 0,408 mm.

**Stanowisko badawcze**

Stanowisko badawcze zostało przystosowane do badania modeli o stałej średnicy 200 mm i wysokości do 1000 mm. Obciążenie modeli ciśnieniem zewnętrznym uzyskano za pomocą pompy próżniowej. Dzięki zastosowaniu czujnika pomiaru ciśnienia i zaworu regulującego możliwe było zadawanie żądanej wartości podciśnienia we wnętrzu modelu oraz utrzymywanie jego wartości na stałym poziomie. Laserowy czujnik mikroodchyłeń pozwalał na pomiar imperfekcji geometrycznych badanego modelu oraz pomiar deformacji kształtu powłoki przy zadanym podciśnieniu i przyjętej siatce pomiarowej o minimalnym wymiarze oczka 3 x 3 mm. Głównymi elementami stanowiska badawczego są: dwie pierścieniowe podpory z rurą dystansową, prowadnica czujnika laserowego, czujnik laserowy, pompa wraz z czujnikiem ciśnienia i mechanizmem obrotowym oraz jednostka sterująca (rysunek 1).



**Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego:**  
 1 – podpora górna; 2 – podpora dolna;  
 3 – model; 4 – rama; 5 – przesuwna podpora czujnika laserowego; 6 – czujnik laserowy; 7 – prowadnica; 8 – tarcza obrotowa; 9 – czujnik ciśnienia; 10 – pompa; 11 – rura dystansowa

Zarówno dolna, jak i górna podpora, na których umieszczano model, mogą obracać się dookoła własnej osi, umożliwiając tym samym przeprowa-

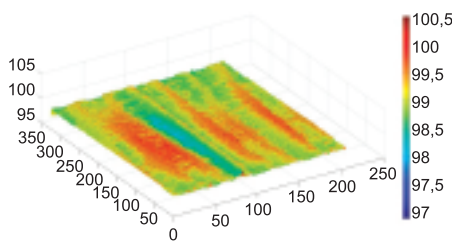
dzenie pomiaru kształtu badanego modelu. Ruch obrotowy jest realizowany przez przekładnię pasową i koła napędowe. Szczelność na styku krawędzi modelu i podpory zapewniają gumowe uszczelki umieszczone w obwodowych bruzdach. Zastosowanie wewnętrznej rury dystansowej uzależnionej od długości modelu zapobiega przeniesieniu na ścianki modelu obciążeń południkowych wynikających z obciążenia ciśnieniem podpór. Stały monitoring ciśnienia wewnętrznego umożliwia czujnik pomiarowy ciśnienia absolutnego. Pomiar deformacji odbywa się za pomocą laserowego czujnika mikroodchyłeń, zamocowanego do przesuwnej podpory poruszającej się po pionowej prowadnicy o długości 1000 mm. Napęd przesuwnej podpory został zrealizowany w oparciu o prowadnicę i wózek linowy. Sterowanie stanowiskiem możliwe jest po połączeniu jednostki sterującej z interfejsem komunikacyjnym. W tym celu wykorzystuje się opracowany na potrzeby obsługi stanowiska skrypt w programie Matlab.

**Pomiary podczas badań**

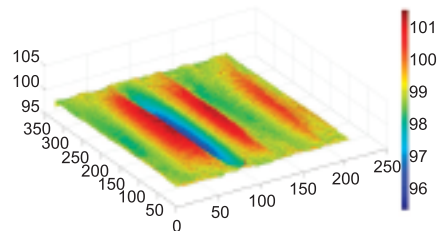
Podczas badań doświadczalnych określone zostały:

- imperfekcje geometryczne każdego z badanych modeli;
- deformacje modeli wynikające ze zmniejszającego się ciśnienia wewnętrznego;
- wartości ciśnień, przy których dokonywano pomiarów deformacji;
- wartości ciśnień, przy których dochodziło do zniszczenia modeli;
- kształt modeli po zniszczeniu.

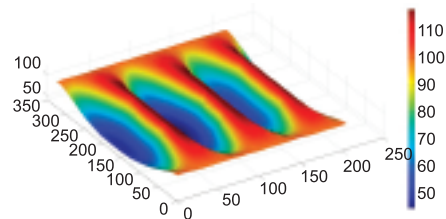
Na rysunkach 2 ÷ 4 przedstawiono sposób rozprzestrzeniania się deformacji modelu wraz ze zwiększającą się wartością podciśnienia dla przykładowego modelu z grupy G3 o wysokości 980 mm. Na osiach ukośnych odmierzone punkty siatki pomiarowej o oczku



**Rys. 2. Mapa imperfekcji geometrycznych modelu G3-15 – pomiar referencyjny**



**Rys. 3. Mapa deformacji modelu G3-15 w przypadku ciśnienia  $p = 210$  mbar**



**Rys. 4. Mapa deformacji modelu G3-15 po zakończonym badaniu**

3 x 3 mm. Mapy przedstawiają odległość punktu pomiarowego od nominalnej osi centralnej stanowiska w [mm].

*Badania zostały przeprowadzone w ramach projektu o numerze 4T07E05429 sfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego*

**Abstract**

Steel thin-walled cylindrical shells are main structural elements of silos, tanks, chimneys and pipelines. They are characterized by high  $r/t$  ratio (where „ $r$ ” is a radius of the shell, „ $t$ ” thickness of its wall). This specific geometry makes them very sensitive to external pressure and imperfections. Due to the significant differences between the values of the buckling loads obtained using of two alternative methods proposed in the standard PN-EN 1993-1-6:2009 the experimental studies were carried out. This paper presents experimental research of steel cylindrical shells subjected to external pressure.

**Literatura**

- [1] PN-EN 1993-1-6:2009. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: „Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych”, PKN, Warszawa 2009.
- [2] Heizig T. Rozprawa doktorska pt.: „Stateczność smukłych powłok walcowych obciążonych podciśnieniem”.
- [3] Schneider W., Brede A.: „Consistent Equivalent Geometric Imperfections for the Numerical Buckling Strength Verification of Cylindrical Shells under Uniform External Pressure”, Thin-Walled Structures, Vol. 43, No. 2, 175 – 188.