

dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. PK^{1*)}

dr inż. Teresa Seruga¹⁾

dr inż. Mariusz Zych¹⁾

dr inż. Szymon Kaźmierczak¹⁾

mgr inż. Łukasz Ślaga¹⁾

Badania doświadczalne sprężonej powłoki ochronnej stalowego zbiornika amoniaku

Experimental investigations of post-tensioned concrete shield wall for ammonia steel tank

DOI: 10.15199/33.2015.09.

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób realizacji powłoki z betonu sprężonego stanowiącej osłonę zbiornika stalowego, w którym magazynowany jest amoniak o temperaturze dochodzącej do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych w trakcie realizacji sprężenia, które stanowią podstawę do oceny skuteczności zrealizowania założeń projektowych.

Słowa kluczowe: połączenie przegubowo-przesuwne, powłoka walcowa sprężona, stokaż amoniaku.

Abstract. This paper presents method of realization of a post-tensioned concrete tank shell which pose the last barrier in ammonia storage tank where temperature may decrease to $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. The paper presents results of investigations that were conducted during the post-tensioning of the tank wall. The aim of the tests was to evaluate the effectiveness of post-tensioning.

Keywords: ammonia storage tank, cylindrical post-tensioned shell, sliding joint.

Zbiorniki amoniaku, poza wymaganiami ogólnymi stawianymi zbiornikom na ciecze [1 – 4], podlegają przepisom Dyrektywy 96/82/EC [5] z 9 grudnia 1996 r., obowiązującym we wszystkich krajach Unii Europejskiej. Niestety, mimo coraz nowocześniejszych technologii, nadal zdarzają się awarie i katastrofy tych zbiorników. Jednym z przykładów jest katastrofa stokażu amoniaku w Jonawie (Litwa), który 20 marca 1989 r. przewrócił się na bok, uszkadzając ścianę i uwalniając 7000 ton ciekłego amoniaku. Opary uległy zapłonowi, a ogień rozprzestrzenił się na cały kompleks zabudowy zawierającej 35 tys. ton nawozów zgromadzonych w magazynach. W katastrofie zginęło ok. 60 osób zagazowanych NH_3 , który utworzył rozlewisko o głębokości 0,70 m na bardzo dużym obszarze. Kolejnym przykładem jest niedawny wybuch w fabryce nawozów w West (Teksas, USA). Bilans katastrofy to kilkanaście osób zabitych i ponad 200 rannych. Pożar doprowadził do eksplozji dwóch zbiorników z amoniakiem, która zniszczyła nie tylko fabrykę, ale i sąsiednie zabudowania.

Zbiorniki amoniaku zwykle projektowane są z dwoma stalowymi ścianami i stalowym dnem oraz zewnętrzną konstrukcją betonową, która ma na celu zapewnienie kilkustopniowej ochrony przed katastrofą

w wypadku awarii. Ponadto, zbiorniki ciśnieniowe do składowania amoniaku izolowane są w celu zmniejszenia wymiany ciepła z otoczeniem. W artykule skupiono się na przedstawieniu konstrukcji betonowej powłoki walcowej, stanowiącej ostatnią barierę chroniącą przed przedostaniem się NH_3 do otoczenia wraz z analizą jej radialnych przemieszczeń na etapie sprężania. Zaprezentowany zbiornik jest jednym z dwóch tego typu w Polsce. Projekt konstrukcji ściany osłonowej został opracowany przez Zakład Konstrukcji Sprężonych Politechniki Krakowskiej dla Zakładów Azotowych PUŁAWY S.A. Doświadczenia wynikające z realizacji pierwszego tego typu obiektu w Polsce, projektowanego i realizowanego również przy udziale Zakładu Konstrukcji Sprężonych Politechniki Krakowskiej, przedstawiono w pracach [6, 7].

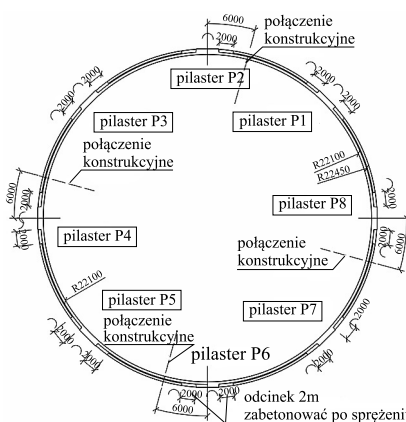
Opis konstrukcji

Ściana żelbetowego zbiornika (fotografia) o wysokości 15,5 m, wewnętrznym promieniu 22,1 m i grubości 0,35 m została wykonana z betonu sprężonego. Sprężenie ściany zrealizowano za pomocą 44 obwodowych wewnętrznych cięgien typu $7 \times 7 \text{ } \varnothing 5 \text{ mm}$ (sploty typu Y1860S7). Każde obwodowe cięgno składa się z czterech dwuprzęsłowych cięgien, kotwionych w pilastrach splotowych lub parzystych (kolejne obwody przemiennie). W celu zrealizowania naciągu i kotwienia cięgien sprężających, zaprojektowano 8 pilastrów szerokości 3,0 m



Widok stokażu amoniaku
View of ammonia storage tank

i grubości 0,75 m. Powłoka walcowa została podzielona po obwodzie na 4 segmenty betonowane w 7 obwodowych pasmach. Pionowe połączenia konstrukcyjne rozmieszczone w odległości 6,0 m od osi pilastrów 2, 4, 6 i 8 w kierunku pilastrów 1, 3, 5 i 7 (rysunek 1). Ścianę zbiornika z betonu sprężonego wykonano z betonu klasy C45/55 z zastosowaniem cementu portlandzkiego



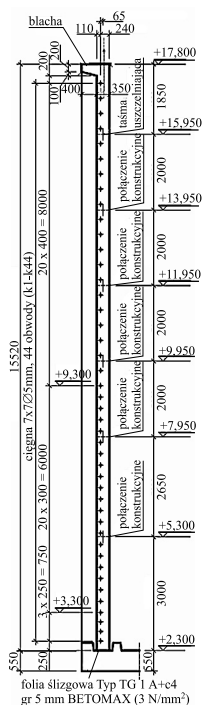
Rys. 1. Przekrój poziomy przez powłokę walcową zbiornika
Fig. 1. Horizontal cross-section of cylindrical tank shell

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

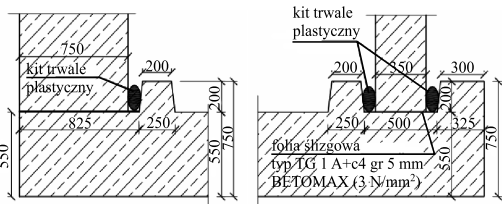
^{*)} Autor do korespondencji:
e-mail: aseruga@pk.edu.pl

CEM I 42,5 i kruszywa bazaltowego. Kable sprężające rozmieszczono w rozstawach 0,25, 0,30 i 0,40 m (rysunek 2). W pierwszej kolejności zrealizowano naciąg w cięgnach kotwionych w pilastrach parzystych. W drugim etapie wprowadzono siły do cięgien kotwionych w pilastrach nieparzystych, poczynając również od dolnej krawędzi powłoki walcowej.

Połączenie ściany z dnem zaprojektowano jako przegubowo-przesuwne z siłą tarcia. W rowku głębokości 0,2 m i szerokości 0,5 m, na obwodzie dna zbiornika ułożono folię poślizgową typu TG1A+c4 grubości 5 mm (3 N/mm²). Brzdę pomiędzy powłoką zbiornika a ściankami rowka wypełniono kitem asfaltowo-kauczukowym o elastycznym odprężeniu wynoszącym 95% w temperaturze +20°C. Masę uszczelniającą ułożono od strony wewnętrznej przed sprężeniem powłoki walcowej, a od strony zewnętrznej po sprężeniu powłoki walcowej (rysunek 3).



Rys. 2. Przekrój pionowy przez ścianę zbiornika
Fig. 2. Vertical cross-section of the tank wall



Rys. 3. Połączenia powłoki walcowej z dnem zbiornika: a) w osiach pilastrów; b) w osiach segmentów ściany między pilastrami
Fig. 3. Cylindrical tank shell joints to the tank bottom: a) at the axis of the buttress; b) at the axis of the segment wall between the buttresses

Program i wyniki badań doświadczalnych

Zakres badań obejmował:

- ocenę podstawowych właściwości mechanicznych betonu, dna i powłoki walcowej zbiornika (wytrzymałości betonu na ściskanie, rozciąganie osiowe oraz modułu sprężystości);
- pomiary radialnych przemieszczeń powłoki zbiornika podczas sprężenia;

- pomiary odkształceń betonu w wybranych przekrojach na obwodzie powłoki;

- pomiary zmian rozwarcia poziomego i pionowych połączeń konstrukcyjnych.

Wytrzymałość betonu na ściskanie określona po 28 dniach dojrzewania na kostkach wynosiła $f_{cm, cube} = 54,22$ MPa, na walcach $f_{cm, cyl} = 46,90$ MPa, a siczny moduł sprężystości określony na walcach $E_{cm} = 44,4$ GPa.

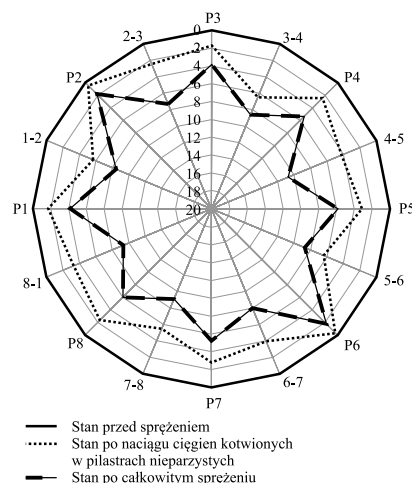
Pomiar radialnych przemieszczeń ściany zbiornika przeprowadzono za pomocą 16 czujników zegarówkich rozmieszczonych na wysokości 0,25 m, w osiach wszystkich pilastrów oraz wszystkich segmentów ścian między pilastrami. Rozkłady radialnych przemieszczeń wyznaczone na obwodzie powłoki zbiornika po naciągu cięgien kotwionych w pilastrach parzystych i po naciągu wszystkich cięgien przedstawiono na rysunku 4. Średnie przemieszczenie określone w osi segmentów ścian między pilastrami wynosiło 8,76 mm ($v = 11,09\%$), a w osi pilastrów nieparzystych i parzystych odpowiednio 4,76 mm i 3,72 mm, natomiast średnie przemieszczenie całej powłoki 6,50 mm ($v = 40,31\%$).

Pomierzone przemieszczenia ściany zbiornika zostały porównane z wynikami otrzymanymi z modelu analitycznego. Wpływ przyjęcia schematu statycznego na rozkład odkształceń i naprężeń w powłokach walcowych omówiono szczegółowo w pracy [8]. W obliczeniach przyjęto powłokę o stałej grubości podpartą w sposób przegubowo-przesuwny ze współczynnikiem tarcia $\mu = 0,15$. Średnia wartość przemieszczeń radialnych powłoki o stałej grubości 0,35 m, uzyskana z obliczeń statycznych, wynosiła 6,52 mm.

Podsumowanie

Określona doświadczalnie średnia wartość radialnego przemieszczenia powłoki walcowej odpowiada wartości określonej przy przyjęciu współczynnika tarcia pomiędzy ścianą a dnem zbiornika $\mu = 0,15$. Zastosowana warstwa ślizgowa spełniła więc swoją rolę. Nieco większa wartość współczynnika tarcia jest konsekwencją lokalnego skrępowania powłoki zbiornika w miejscach pilastrów (rysunek 3).

Znacznie cięższe pilastry doznały mniejszych przemieszczeń. Wydaje się



Rys. 4. Rozkłady radialnych przemieszczeń ściany zbiornika [mm]
Fig. 4. Distribution of radial displacements of the tank wall [mm]

w pełni uzasadnione, aby w kolejnych realizacjach tego typu obiektów zmodyfikować sposób układania warstwy poślizgowej pod pilastrami, tak aby uzyskać bardziej równomierny rozkład radialnych przemieszczeń na całym obwodzie ściany zbiornika.

Literatura

- [1] Eurocode 2: PN-EN 1992-3. Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 3: Silosy i zbiorniki na cieczę, listopad 2008, s. 23.
- [2] Flaga K., Klimczak B., Knoppik-Wróbel A.: Metody obliczeniowe przewidywania ryzyka zarysowania ścian przyczółków mostowych, Inżynieria i Budownictwo nr 5/2013, s. 271 – 276.
- [3] Halicka A., Franczak D.: Projektowanie zbiorników żelbetonowych. Zbiorniki na cieczę. PWN, Warszawa, 2013.
- [4] Zych M.: Wpływ skrępowania elementów z betonu na odkształcenia wymuszone według PN-EN 1992-3, Inżynieria i Budownictwo nr 1/2015, s. 12 – 16.
- [5] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 96/82/WE z 9 grudnia 1996 r. dotycząca zarządzania zagrożeniami poważnymi awariami z udziałem substancji niebezpiecznych.
- [6] Seruga A.: Realizacja prototypowej cylindrycznej powłoki osłonowej z betonu sprężonego dla stalowego zbiornika amoniaku. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowe Rozwiązania Konstrukcyjne i Technologiczne w Budownictwie Betonowym”, Wrocław – Szklarska Poręba, 23-26.06.1994, materiały konferencyjne s. 143 – 148.
- [7] Seruga A.: Cylindrical prestressed concrete shield wall for ammonia steel tank. XII Congress of the FIP, Amsterdam, Holland 23-29 May 1998, Proceedings Vol. 1, s. 451 – 454.
- [8] Seruga A.: Analiza stanów naprężenia i odkształcenia w powłokach zbiorników cylindrycznych z betonu sprężonego, Monografia nr 289, Kraków, 2003.

Przyjęto do druku: 08.08.2015 r.