

dr inż. Rafał Sieńko^{1)*}
mgr inż. Tomasz Howiacki¹⁾

Wpływ imperfekcji wykonawczych na wyężenie stalowego zbiornika wieży ciśnień

Impact of executive errors on effort of water tower steel tank

DOI: 10.15199/33.2015.09.44

(Studium przypadku)

Streszczenie. W artykule omówiono wpływ imperfekcji wykonawczych na powstanie stanu awaryjnego stalowej konstrukcji wieży ciśnień. Odchyłki wymiarów elementów spowodowały powstanie znacznego karbu konstrukcyjnego, który zmienił sposób pracy żeber usztywniających powłokę zbiornika. Siła równoleżnikowa w powłoce przekazywana była między jej poszczególnymi fragmentami przez żebra, gdzie odchyłki wykonawcze spowodowały powstanie mimośrodków o wartości ok. 70 mm. Znaczne wyężenie spoin łączących płaszcz z żebrami, długi okres eksploatacji w trudnych warunkach oraz cyklicznie zmieniające się obciążenie spowodowały zmęczeniowe pęknięcia spoin i w konsekwencji wyciek wody ze zbiornika.

Słowa kluczowe: imperfekcje wykonawcze, wieża ciśnień.

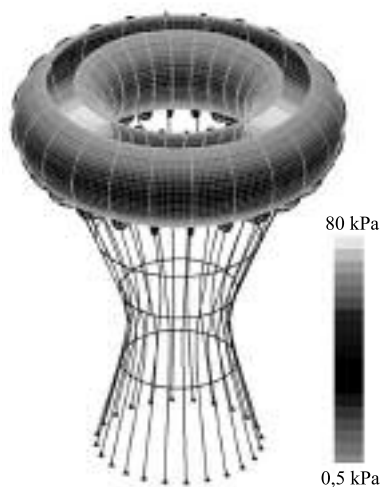
Abstract. The article discusses the impact of executive errors on the creation of emergency state in steel structure of water tower. Deviations of elements' dimensions have caused a significant structural notch, which changed the way of stiffening ribs work in the tank coat. Design latitudinal force should be transferred axially, finally eccentricities up to 70 mm have been observed. Large effort of the welds connecting the ribs with the coat, long service life in harsh conditions and periodically changing load caused fatigue crack and water leak from the tank.

Keywords: executive errors, water tower.

Artykuł dotyczy zbiornika na wodę pitną, wzniesionego pod koniec lat siedemdziesiątych XX w., o konstrukcji stalowej, w kształcie torusa, pojemności 3000 m³ wspartego na 24 słupach o przekroju dwuteowym (rysunek 1). Obiekt ma 36,8 m wysokości, średnica zewnętrzna zbiornika wynosi 28,4 m, a średnica przekroju poprzecznego torusa – 8 m. Słupy zostały zaprojektowane jako styczne do powierzchni hiperboloidy obrotowej, średnicy 14 m w miejscu połączenia z płytą fundamentową, z torusem – 20 m, a w miejscu najwyższym – 9 m. Stężono je obwodowymi pierścieniami. Płaszcz torusa został wykonany z blach grubości 10 mm łączonych doczołowo spoinami typu Y. Wzdłuż obwodu zbiornika rozmieszczono 24 poprzeczne żebra usztywniające o przekroju zamkniętym prostokątnym. Elementy konstrukcyjne wieży ciśnień przedstawiono na fotografii 1.

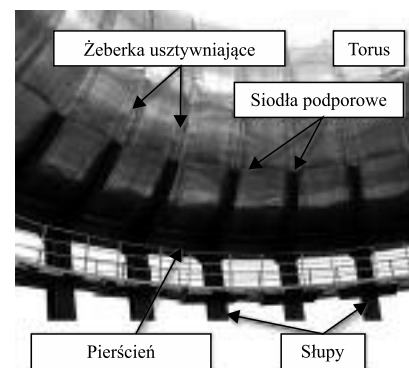
Pomimo wymagania bardzo dużej dokładności przy wznoszeniu konstrukcji stalowych, nie jest możliwe stworzenie konstrukcji geometrycznie idealnej. Wynika to m.in. z przyjętych tolerancji w przypadku poszczególnych elementów konstrukcyj-

nych, niedokładności montażowych, czy po prostu błędów ludzkich. W celu oceny stopnia wyężenia poszczególnych elementów obiektu wykonano jego model numeryczny (rysunek 1) i poddano analizie wpływ niewłaściwego zaprojektowania i wykonania połączenia płaszcza torusa z żebrami obwodowymi na powstanie (w 2007 r.) stanu awaryjnego wieży.



Rys. 1. Model numeryczny wieży ciśnień [ABC Obiekt 3D]: rozkład naprężeń równoleżnikowych w powłoce od obciążenia wodą – rysunek poglądowy

Fig. 1. Numerical model of water tower [ABC Obiekt]: distribution of latitudinal stress in the coat caused by water load – visual view



Fot. 1. Elementy konstrukcyjne wieży ciśnień

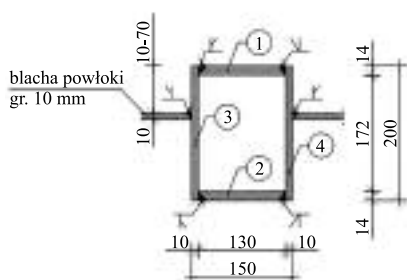
Photo 1. Structural members of water tower

Konstrukcja połączenia żeber z powłoką

Obwodowe żebra usztywniające o przekroju zamkniętym 150 x 200 mm wykonano z blach grubości 10 oraz 14 mm, łącząc je ciągłą spoiną czołową typu 1/2Y. Połączenie blach płaszcza torusa z żebrami zaprojektowano jako spawane do blach nr 3 i 4 w płaszczyźnie równoległej do blachy ścianki nr 1 (rysunek 2). Na skutek imperfekcji wykonawczych, w wyniku których płaszcz miał większy obwód od obwodu wewnętrznej ścianki (nr 1) żebra, blachy powłoki torusa mocowane były do ścianek bocznych nr 3 i 4 w odległości 10 ± 70 mm

od krawędzi ścianki 1 (rysunek 2). Takı sposób połączenia powodował powstanie znacznego karbu konstrukcyjnego i całkowitą zmianę sposobu pracy żebra.

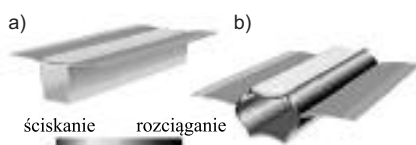
Pomiary średnicy wewnętrznej przekroju poprzecznego torusa w płaszczyźnie poziomej wykazały istotną różnicę pomiędzy poszczególnymi przekrojami wynoszącą ok. 80 mm. W płaszczyźnie pionowej odchyłka była znacznie mniejsza – ok. 10 mm. Odległości w świetle między żebrowymi usztywniającymi mierzone w połowie wysokości torusa różniły się między sobą o 10 ÷ 70 mm. Większe niedokładności stwierdzono od strony zewnętrznej zbiornika.



Rys. 2. Szczegół połączenia blachy płaszcza z żebrem usztywniającym; 1, 2, 3, 4 – oznaczenie ścianek żebra usztywniającego
Fig. 2. Detail of connection between the coat and stiffening rib; 1, 2, 3, 4 – designation of stiffening rib walls

Analiza numeryczna

Rozważono wpływ imperfekcji wykonawczych na sposób przekazywania sił z powłoki zbiornika na ściankę nr 1 żebra usztywniającego. Do analizy przyjęto wartości charakterystyczne rozciągających sił membranowych w powłoce torusa wywołanych oddziaływaniem ciężaru własnego, parcia wody oraz wiatru, które uzyskano z przestrzennego modelu konstrukcji. W celu szczegółowej analizy wpływu niedokładności wykonawczych na pracę konstrukcji przygotowano oddzielny model odcinka żebra usztywniającego wraz z mimośrodowo połączoną powłoką zbiornika. Rozpatrzono przypadek minimalnej zmierzonej odchyłki (10 mm) oraz maksymalnej (70 mm) – rysunek 3. W celu zapewnienia czytelności wyników



Rys. 3. Rozkład naprężeń dla połączenia z imperfekcją: a) 10 mm; b) 70 mm [SOFiSTiK]
Fig. 3. The stress distribution for the connection with imperfection: a) 10 mm; b) 70 mm [SOFiSTiK]

obliczeń, w modelu nie uwzględniono sił powodujących południkowe rozciąganie lub ściskanie żebra usztywniającego.

Analiza obliczeniowa wykazała niewystarczającą nośność węzła konstrukcyjnego, będącą skutkiem niewłaściwego wykonawstwa. Dopuszczenie do nieosiowego przekazania sił z powłoki torusa na ścianki poprzeczne żebrowe usztywniających spowodowało:

- powstanie złożonego stanu pracy elementów żebrowe usztywniających; ścianki pionowe i poziome są bardzo silnie zginane, przez co spoiny oprócz rozciągania, muszą przenosić także momenty zginające;
- powstanie naprężeń przekraczających charakterystyczną granicę plastyczności stali (naprężenia w przypadku średniej imperfekcji wynosiły $\sigma = 320 \text{ MPa} >> f = 235 \text{ MPa}$ dla najniekorzystniejszej kombinacji obciążeń);
- powstanie karbu konstrukcyjnego oraz spawalniczego [1]. Zastosowanie spoin czołowych układanych wyłącznie z jednej strony (przyjęto spoiny $\frac{1}{2} Y$ oraz $\frac{1}{2} V$) powoduje, że istnieje prawdopodobieństwo braku podtopienia krawędzi wewnętrznych blach [2]. Powstała szczelina może być przyczyną postępującego pęknięcia spoiny;
- zmęczenie materiału powstałe w wyniku dużego wyteżenia elementów żebra, częstych zmian naprężeń od wartości bliskich zeru do wartości maksymalnych oraz długiego okresu użytkowania (znaczną liczbą cykli obciążeń).

Potwierdzeniem występowania zjawiska zmęczenia materiału jest sposób pęknięcia spoin łączących blachy powłoki torusa z żebrem (fotografia 2), które zaobserwowano w czerwcu 2007 r. Pęknięcia zainicjowane były od strony wewnętrznej, a ich stopniowe poszerzanie doprowadziło do pęknięć wskrośnych, co skutkowało wyciekami wody ze zbiornika. Na fotografii 2 widoczne są ślady korozji w pękniętej spoinie świadczące o tym, że proces jej niszczenia przebiegał w długim czasie.

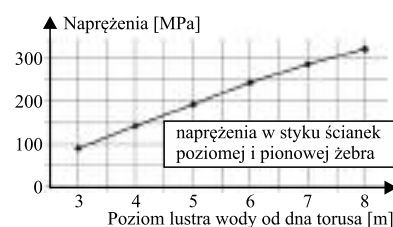


Fot. 2. Pęknięcie zmęczeniowe w obrębie niewłaściwego połączenia żebra z płaszczem

Photo 2. Fatigue crack within the improper rib connection with the coat

Podsumowanie

W obliczeniach należy przewidzieć możliwość wystąpienia imperfekcji geometrycznych i materiałowych, a na etapie budowy dołożyć wszelkich starań, by zapewnić maksymalną dokładność wykonania. Dopuszczalne tolerancje geometryczne różnych typów elementów konstrukcyjnych określone są przez odpowiednie normy [5] oraz wytyczne projektowe. Przedstawiony przykład wieży ciśnieniowej pokazuje, że dbałość o detale konstrukcyjne ma istotny wpływ na bezpieczeństwo całego obiektu [3, 4]. Zaobserwowane nieprawidłowości w stalowej konstrukcji oraz szczegółowa analiza numeryczna wskazują, że jej użytkowanie przy pełnym obciążeniu eksploatacyjnym stwarza ryzyko wystąpienia awarii. Stąd przyjęto założenie o ograniczeniu tego obciążenia. Na rysunku 4 przed-



Rys. 4. Zmiany naprężeń w narożu żebra w zależności od poziomu lustra wody
Fig. 4. Changes of stress in rib corner depending on the water level

stawiono zależność naprężeń w styku ścianki poziomej i pionowej żebra od poziomu wody w zbiorniku. Innym rozwiązaniem byłoby przeprowadzenie generalnego remontu wieży lub zmiana jej sposobu użytkowania skutkująca zmniejszeniem obciążenia. Rozważane było przekształcenie zbiornika w obiekt użyteczności publicznej (restaurację). Podjęcie decyzji o rozbiórce byłoby nieuzasadnione ze względu na stosunkowo dobry stan techniczny całej konstrukcji oraz jej historyczny charakter.

Literatura

- Fotografie – Autorzy
- [1] Ziółko J., Włodarczyk W., Mendera Z., Włodarczyk S., Stalowe konstrukcje specjalne, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1995.
 - [2] Ferenc K., Ferenc J., Konstrukcje spawane. Połączenia, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
 - [3] Kowalski D., Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczyźnie stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej. Praca doktorska, Politechnika Gdańska 2004.
 - [4] Błażejewski P., Marciniowski J., Najbardziej niekorzystne imperfekcje geometryczne stalowych powłok sferycznych, Budownictwo i Architektura 2014.
 - [5] PN-EN 1993-4-2:2007U – Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 4-2: Zbiorniki.

Przyjęto do druku: 12.08.2015 r.