

Dariusz KOWALSKI<sup>1</sup>

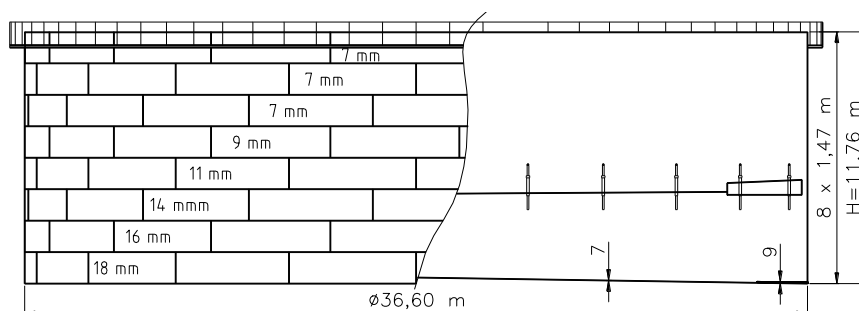
## BADANIA TENSOMETRYCZNE PŁASZCZA ZBIORNIKA Z IMPERFEKCJAMI KSZTAŁTU

W referacie przedstawiono wykorzystanie tensometrycznej metody pomiaru odkształceń do oceny rozkładu naprężeń powierzchniowych w konstrukcji powłoki rzeczywistego obiektu. Obiektem poddanym polowym badaniom był stalowy zbiornik magazynowy, o osi pionowej, z dachem pływającym, o pojemności nominalnej  $V=12\ 000\ m^3$ . Badany zbiornik charakteryzował się znacznymi imperfekcjami geometrycznymi walcowej powłoki tworzącej płaszcz.

Celem realizacji omawianych badań była weryfikacja numerycznych metod analizy wybranego typu konstrukcji o znacznej nieliniowości geometrycznej.

### 1. Obiekt badań

Badaniom poddany został istniejący zbiornik magazynowy eksploatowany przez okres niespełna 40 lat. Zbiornik wykonany był w całości jako stalowy. Poszczególne arkusze stalowe blach, tworzące płaszcz zbiornika, w pierścieniach oraz pierścienie pomiędzy sobą łączone były na spoiny czolowe. Pojemność nominalna zbiornika wynosiła  $12\ 000\ m^3$ . Zbiornik wyposażony był w dach pływający typu pontonowo - membranowego. Górna krawędź cylindrycznego płaszcza była usztywniona stężeniem wiatrowym w formie pierścienia wykonanego z blach grubości 6 mm i zakończonych po zewnętrznej stronie ceownikiem o wysokości 80 mm. Zbiornik posadowiony był na fundamencie piaskowym, otoczonym żelbetowym pierścieniem fundamentowym. Zasadnicze wymiary obiektu przedstawiono na poniższym rysunku (rys. 1). Na rysunku podano pierwotne grubości blach stalowych.



Rys. 1. Konstrukcja zbiornika

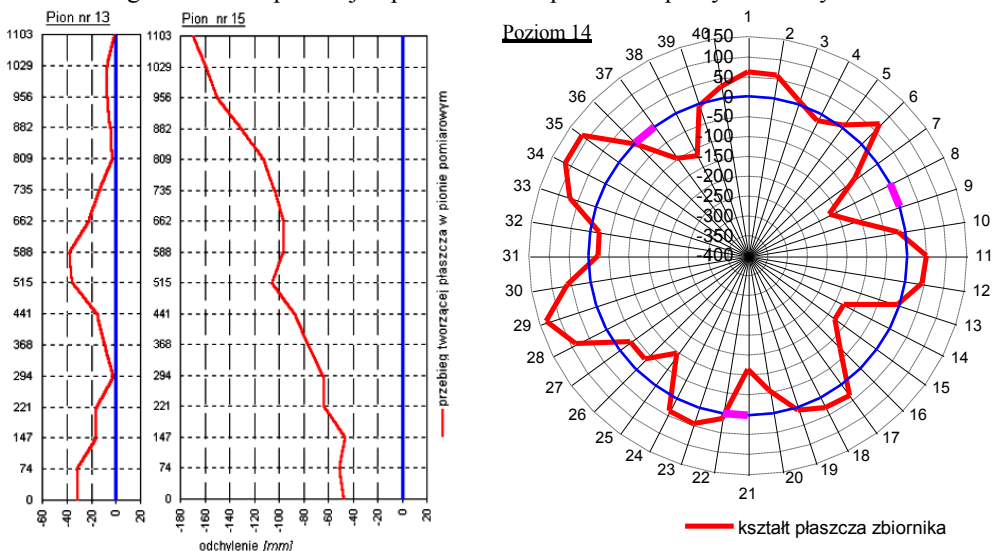
<sup>1</sup> mgr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra Konstrukcji Metalowych, 80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12

## 2. Imperfekcje geometryczne powłoki płaszcza

Powierzchnia cylindrycznej powłoki płaszcza zbiornika posiadała znaczne imperfekcje geometryczne kształtu. Zastane na obiekcie niedoskonałości pochodzą zarówno z okresu budowy obiektu, jak i późniejszej eksploatacji. Wielkości deformacji płaszcza znacznie przekraczały dopuszczalne wartości normowe określone dla tego typu konstrukcji wymaganych zarówno w aktualnych [1] jak i poprzednich normach [2].

Deformacje z okresu budowy to przede wszystkim załamania kątowe na spawanych stykach pionowych i poziomych. Kolejnym powodem powstania złego kształtu powłoki to niedokładności wytyczenia okręgu dla pierwszego pierścienia płaszcza na obrzeżu stalowego dna zbiornika. Odchyłki od centrycznego ustawienia pierścienia płaszcza wynoszą od  $-57$  do  $56$  mm. Zróżnicowanie długości promienia zakrzywienia walcowej powłoki zbiornika już na poziomie dna wynosiły  $113$  mm. Konsekwencją niecylindryczności pierwszego pierścienia płaszcza jest montaż kolejnych pierścieni na nieprawidłowej bazie. Wszelkie prace przy montażu kolejnych arkuszy blach zmierzające do poprawy kształtu wiążą się z wprowadzaniem dodatkowych odkształceń i sił wewnętrznych do istniejących już elementów. Sumowanie się niedokładności trasowania i ustawiania każdego kolejnego pierścienia powoduje zwiększenia deformacji powłoki.

Kolejną przyczyną nowych imperfekcji lub powiększania się istniejących jest proces nierównomiernego osiadania obiektu na fundamencie piaskowym. Proces ten związany jest z niejednorodnością morfologiczną gruntu, stopniem zagęszczenia poduszki piaskowej oraz nierównomiernością obciążenia pomiędzy obrzeżem a środkiem dna zbiornika. Wynika to z skupionego na samym obwodzie ciężaru własnego płaszcza zbiornika. Zmiana obciążenia na obwodzie związana jest również z pracą statyczną dna pod obciążeniem, a mianowicie z obrotem węzła „dno-płaszcz”. Zmienność stopnia zagęszczenia poduszki piaskowej na powierzchni fundamentu związana jest z oddziaływaniami atmosferycznymi. W szczególności z zamarzaniem i odmarzaniem części gruntu znajdującego się w bezpośrednim sąsiedztwie żelbetowego pierścienia otaczającego fundament. Zróżnicowanie osiadania na obwodzie dochodzi do  $49$  mm. Nieznana jest całkowita wartość osiadania zbiornika oraz jego zmian w czasie całego okresu eksploatacji z powodu braku pomiarów powykonawczych.



Rys. 2. Przykłady niedoskonałości geometrycznych płaszcza zbiornika

Maksymalne deformacje płaszcza zbiornika istniejące w przededniu przeprowadzenia kontrolowanego testu wodnego wynosiły:

- -169 mm (imperfekcja do wnętrza zbiornika),
- 149 mm (imperfekcja na zewnątrz).

Istniejący stan deformacji płaszcza odtworzony został na podstawie pomiarów geodezyjnych, które wykonano na 40 pionach pomiarowych rozłożonych równomiernie na obwodzie zbiornika. Pomiary wykonano na 17 poziomach – tj. ma stykach pomiędzy pierścieniami oraz w połowie wysokości każdego pierścienia. Przykładowy stan deformacji powłoki płaszcza przedstawiono na dwóch wytypowanych pionach oraz jednym poziomie pomiarowym (rys. 2).

### 3. Przygotowanie i przebieg badań

W ramach przygotowań do pomiarów niezbędne były do przeprowadzenia następujące prace:

- geodezyjne pomiary istniejącej geometrii płaszcza zbiornika oraz niwelacja obwodu dna zbiornika,
- analizy statystyczne niedoskonałości geometrycznych powłoki płaszcza,
- wstępne analizy numeryczne zdeformowanej powłoki wygenerowanej na podstawie pomiarów geodezyjnych,
- wstępne określenie lokalizacji tensometrycznych pionów pomiarowych,
- korekta lokalizacji i usytuowanie dodatkowych punktów pomiarowych,
- montaż elektrooporowych tensometrów foliowych typu LY 116/120 wraz z odpowiednim okablowaniem oraz tensometrami kompensującymi wpływ zmian temperaturowych,
- pomiary rzeczywistej grubości blach płaszcza zbiornika w bezpośrednim sąsiedztwie montażu punktów pomiarowych, pomiar wykonany przy zastosowaniu grubościomierza ultradźwiękowego o dokładności pomiaru 0,1 mm,
- dodatkowa ocena niedoskonałości geometrycznych w obrębie pionów.

Przyjęta zasada rozmieszczenia tensometrycznych punktów pomiarowych oraz punktów pomiarów geodezyjnych została przedstawiona na załączonym rysunku (rys. 3).

Do badań użyta została aparatura pomiarowa będąca w posiadaniu Zespołu Badań Terenowych Katedry Mostów Politechniki Gdańskiej w postaci następujących elementów:

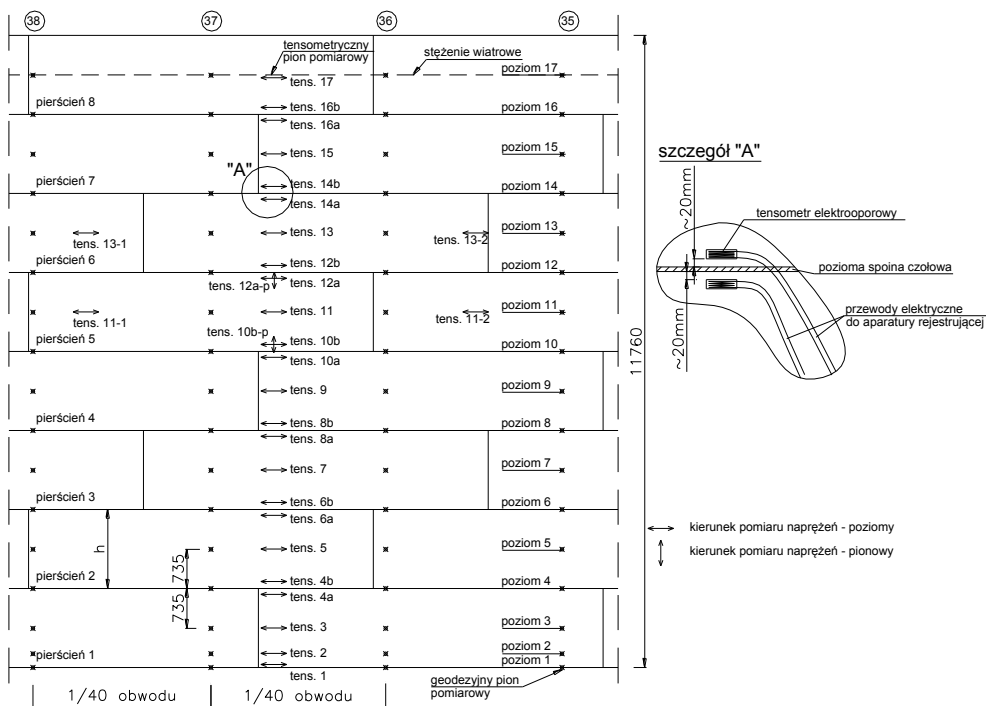
- dwóch wielopunktowych systemów pomiarowych typu UPM60 oraz ONIX 64 ze sterowaniem komputerowym,
- komputerów przenośnych wraz z odpowiednim oprogramowaniem analizującym i archiwizującym.

W programie badań przewidziano wykonanie dwóch pełnych cykli pomiarowych z których każdy składał się z napełnienia i opróżnienia zbiornika. Badanie prowadzono przy wykorzystaniu wody, medium o większym ciężarze właściwym o 15% w porównaniu z ropą naftową magazynowaną w czasie normalnej eksploatacji obiektu.

W czasie napełniania wodą badanego zbiornika wykonywany był ciągły pomiar odkształceń. Co 15 minut aktualny pomiar był archiwizowany automatycznie na dyskach stałych komputerów obsługujących pomiary. Uzyskiwane w czasie pomiaru wyniki rejestrowanych odkształceń na zewnętrznej powierzchni płaszcza były automatycznie przeliczane na naprężenia. Tak uzyskane wartości zmian rozkładu naprężeń powierzchniowych były prezentowane oraz w tej formie zachowywane.

W czasie realizacji pomiarów zaistniały skrajnie niekorzystne warunki pogodowe – nagły powrót zimy i spadek temperatury o około 20°C, jak również nieoczekiwane problemy

techniczne z przepompowaniem wody. Ograniczyło to pomiary do jednego pełnego cyklu i początku napełnienia w cyklu drugim, do wysokości około połowy wymaganej wysokości słupa wody.



Rys. 3. Rozmieszczenie tensometrycznych punktów pomiarowych na płaszczu zbiornika

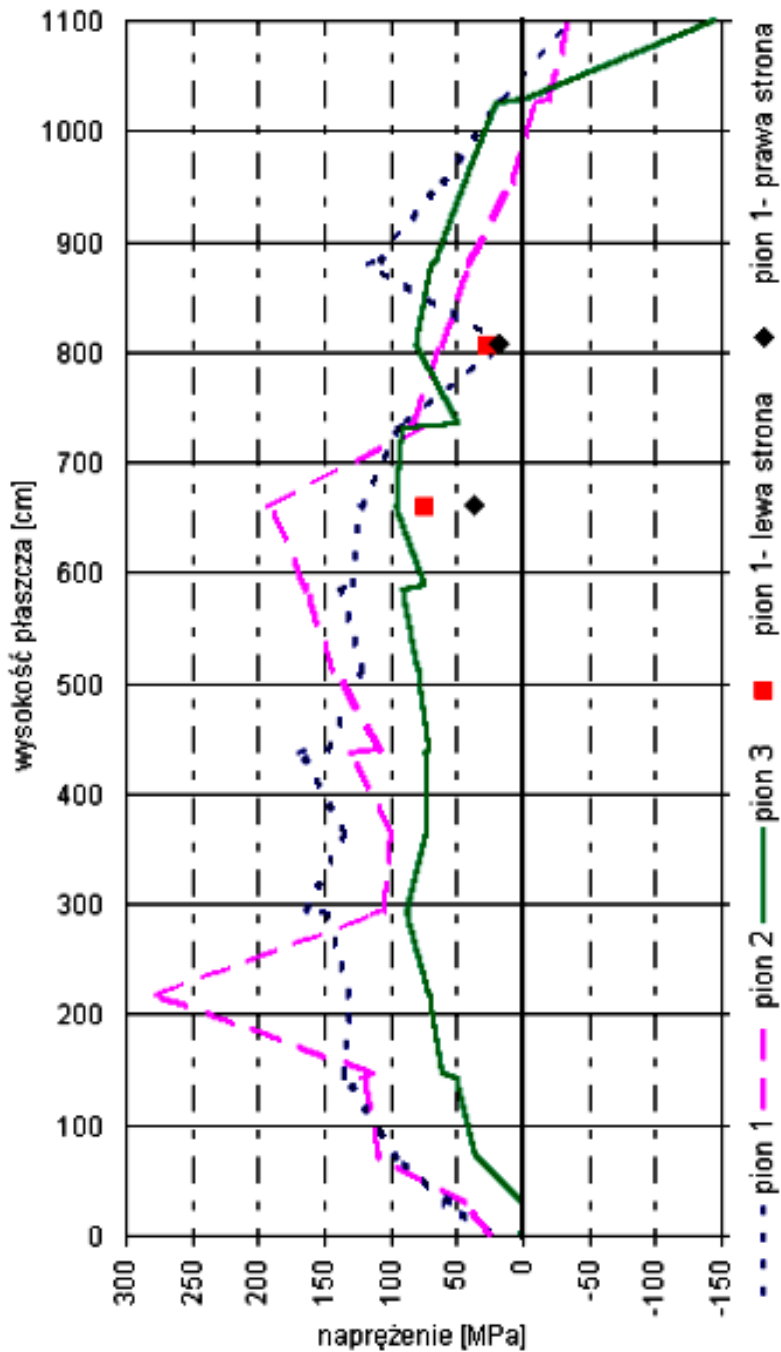
#### 4. Wyniki pomiarów

Uzyskane wyniki pomiarowe z jednego pełnego cyklu pomiarowego pozwalają na określenie maksymalnych wartości naprężeń na zewnętrznej powierzchni stalowego płaszczu zbiornika. Zestawienie otrzymanych rezultatów pomiarowych przedstawiono w postaci wykresu dla trzech pionów pomiarowych oraz dodatkowych punktów (rys. 4).

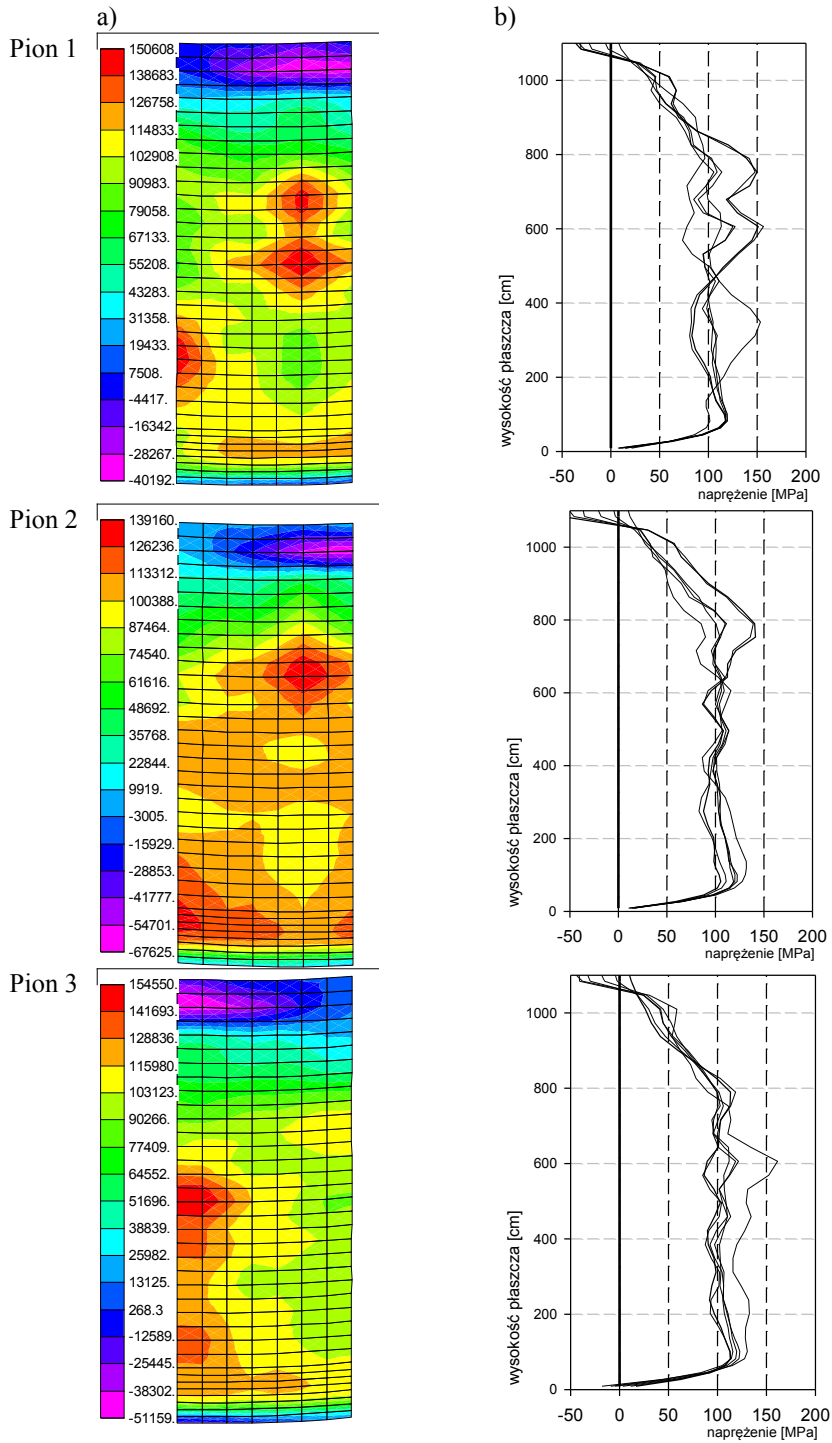
#### 5. Obliczeniami numeryczne obiektu badawczego

Analizę numeryczną zdeformowanej powłoki płaszczu zbiornika przeprowadzono przy wykorzystaniu pakietu obliczeniowego MSC.NASTRAN. Na podstawie posiadanych pomiarów geometrii zbiornika wygenerowano kompleksowy numeryczny model rzeczywistego obiektu. W modelu tym uwzględniono specyficzne warunki niedoskonałości geometrycznych powłoki płaszczu oraz podparcie na fundamencie o skokowo zmiennej sztywności. Model komputerowy utworzony został z dwustu tworzących. Współrzędne dla brakujących węzłów pośrednich zostały określone na podstawie interpolacji wykonanej pomiędzy wartościami znanymi z pomiarów geodezyjnych. Do modelowania konstrukcji stalowej obiektu użyto izoparametrycznych elementów czterowęzłowych typu płytowego łączącego cechy elementów powłokowych z warunkami zgięciowymi. Uzyskane wyniki naprężeń, dla powierzchni

zewnętrznej powłoki zbiornika zostały przedstawione w postaci map rozkładu naprężeń w kierunku obwodowym jak i odpowiednich wykresów zmienności naprężeń (rys. 5).



Rys. 4. Zestawienie uzyskanych na podstawie pomiaru naprężenia w płaszczu zbiornika



Rys. 5. Zestawienie naprężeń w powłoce na podstawie obliczeń MES  
 a) mapy rozkładu naprężeń [kPa], b) wykresy naprężeń w obszarze pomiaru

## 6. Porównanie wyników pomiaru z obliczeniami MES

Porównanie dwóch powyżej przedstawionych metod uzyskania informacji o stanie wyężenia przekroju w rzeczywistej konstrukcji powłokowej z imperfekcjami geometrycznymi kształtu pozwala na następujące stwierdzenia:

- a) wyniki pomiarów tensometrycznych na rzeczywistym obiekcie jak i analiz numerycznych metodą elementów skończonych potwierdziły istnienie, niejednokrotnie znacznego wpływu imperfekcji geometrycznych kształtu na rzeczywisty rozkład naprężeń w konstrukcji powłokowej.
- b) uzyskane, obiema opisywanymi tu metodami, wartości naprężeń na zewnętrznej powierzchni powłoki nie pokrywają się co do wartości bezwzględnej. W obu przypadkach uzyskano jednak podobieństwo co do charakteru i zakresu zmienności wykresów naprężeń. Podobieństwo to występuje również w zakresie zmiany stanu naprężeń – z rozciągających na ściskające - w określonych fragmentach powierzchni.
- c) obie metody uzyskania informacji o stanie naprężeń obarczone są błędami wynikającymi z samych metod jak i konieczności wykonania pewnych założeń,
- d) problemem jest dokładna identyfikacja rzeczywistych niedoskonałości geometrycznych kształtu powłoki. W dużych obiektach powłokowym występuje czasem zjawisko dyslokacji pewnych rodzajów wad, jak i ich zmiana w pewnym zakresie.
- e) brak jakichkolwiek informacji o stanie wyężenia rzeczywistego przekroju bez obciążenia – obie metody przyjmują zdeformowaną powierzchnię konstrukcji jako wolną od dodatkowych naprężeń. Istniejący stan naprężeń dla konstrukcji nieobciążonej może być powodem zmiany geometrii powłoki jak i odkształceń badanej powierzchni,
- f) imperfekcje geometryczne kształtu powłok powodują zmianę wyężenia przekroju co prowadzi w konsekwencji do odstępstw od teorii membranowej wg której są one liczone na etapie projektu,

W ramach dalszych analiz i prac nad określeniem wielkości dopuszczalnych niedokładności wykonawczych należy rozważyć konieczność opracowania odpowiednich klas dopuszczalnych niedokładności montażu konstrukcji w zależności od przyjętego poziomu bezpieczeństwa lub rodzaju magazynowanej cieczy. Sugeruje się konieczność wykonywania na etapie opracowywania projektów konstrukcyjnych analiz wrażliwości konstrukcji powłokowych na niedoskonałości kształtu.

### Literatura

- [1] PN-B-03210:1997 – Konstrukcje stalowe - Zbiornik walcowe pionowe na ciecze - Projektowanie i wykonanie,
- [2] PN-84/B-06210 - Konstrukcje stalowe - Zbiornik walcowe pionowe na ciecze – Wymagania i badania,

## **TENSOMETRIC TEST OF TANK SHELL WITH IMPERFECTIONS SHAPE**

### **Summary**

In the paper are shown the results of measurements of stress in tank shell in real tank. The test was performed with the utilization of electro-resistant tensometric methods. The object of the tested was a vertical tank with nominal capacity of 12 000 m<sup>3</sup> and a floating roof. The shape deformation of the tank shell generating line was very large. This imperfection fluctuated in the range from -170 to + 150 mm. The measurement of the stress state were used for verifying the vales obtained by numerical analysis of the cylindrical shell with imperfections.



---

[1] PN-B-03210:1997 – Konstrukcje stalowe - Zbiornik walcowe pionowe na ciecze -  
Projektowanie i wykonanie,

[2] PN-B/84-06210 - Konstrukcje stalowe - Zbiornik walcowe pionowe na ciecze – Wymagania  
i badania,