

# Politechnika Gdańska

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Katedra Konstrukcji Metalowych

---

## Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej

Kowalski Dariusz

**AUTOREFERAT**

*Pracy doktorskiej*

*Promotor*

prof. dr hab. inż. Jerzy Ziółko

## 1. Wstęp

Imperfekcje płaszcza zbiornika są przyczyną zmiany rozkładu strumieni sił wewnętrznych, a tym samym naprężeń w powłoce. Stanowią one zagrożenie bezpiecznej eksploatacji zbiornika i są potencjalnie powodem występowania takich zjawisk, jak:

- podatność na wyboczenie płaszcza pod wpływem sił ściskających,
- lokalna utrata stateczności fragmentu powłoki,
- lokalne przeciążenie głównego elementu nośnego konstrukcji zbiornika, jakim jest płaszcz.

Imperfekcje geometryczne wpływają nie tylko na nośność i wyężenie eksploatowanych obiektów, ale również na warunki użytkowania samych zbiorników, w szczególności zbiorników z dachami pływającymi. Niejednokrotnie charakter i układ odchyłek geometrycznych powoduje w trakcie eksploatacji nagłe przeskoki pewnych fragmentów powłoki płaszcza w trakcie opróżniania i napełniania zbiornika. Przeskoki te polegają na całkowitej zmianie charakteru imperfekcji, np. z ujemnej na dodatnią i odwrotnie. Efekty takie są szczególnie niebezpieczne, gdyż wpływają znacząco na zmianę wyężenie materiału oraz stan wytrzymałości spoin.

Problem oceny stanu deformacji powłoki płaszcza zbiornika występuje nie tylko podczas odbioru i przekazywania nowego zbiornika do eksploatacji. W trakcie eksploatacji mogą powstać zmiany kształtu powłoki, spowodowane na przykład nierównomiernym osiadaniem obiektu. Zawsze wtedy pojawia się pytanie: *W jakim stopniu stwierdzone imperfekcje geometryczne wpływają na stan wyężenia przekroju?* Pytanie to nabiera większego znaczenia, gdy dotyczy zbiorników po kilkudziesięciu latach eksploatacji, w którym oprócz defektów geometrycznych występują uszkodzenia korozyjne które wiążą się z równomiernym ubytkiem grubości blach płaszcza zbiornika lub też lokalną korozją wżerową.

Początkowe nieprawidłowości kształtu płaszcza zbiornika – imperfekcje geometryczne – powodują powstawanie dodatkowych przemieszczeń układu i zmiany rozkładu strumieni sił wewnętrznych pod wpływem obciążenia eksploatacyjnego. Tak, więc powłoka z imperfekcji pracuje w nieco odmienny sposób od przyjętego, na etapie projektowania, schematu obliczeniowego.

## 2. Cel pracy

Problem oszacowania wpływu istniejących deformacji płaszczy na stan bezpieczeństwa całego obiektu występuje często w użytkowanych zbiornikach magazynowych produktów naftowych. Imperfekcje płaszcza zbiornika powstałe w trakcie jego realizacji oraz w okresie użytkowania stwarzają zagrożenie. Określenie dokładnego wpływu poszczególnych deformacji na stan wyężenia przekroju jest zagadnieniem trudnym do bezpośredniej oceny zarówno przy analizach pojedynczej deformacji jak i z uwagi na ich wzajemną interferencję.

W związku z powyższym postawiono następującą tezę:

*Zdeformowane powłoki walcowe, stanowiące główny element konstrukcyjny zbiorników magazynowych, są zagrożeniem dla bezpiecznej eksploatacji obiektów. Deformacje powłoki walcowej powodują zaburzenie i niejednokrotnie znaczny lokalny wzrost wartości naprężeń w powłoce płaszcza zbiornika. Występujące imperfekcje, w trakcie przyrostu obciążenia ulegają niejednokrotnie zmianom charakteru – tzw. przeskokom powłoki, które są szczególnie niebezpieczne przy współistniejących wadach spawalniczych oraz znacznych uszkodzeniach korozyjnych.*

Rozpoznanie zagadnień przedstawionych w tezie niniejszej pracy ma duże znaczenie praktyczne i przyczyniło się do określenia:

- zakresu zmienności naprężeń w płaszczu zbiornika z deformacjami,
- wartość dopuszczalnych deformacji wstępnych powstałych na etapie wykonawstwa - celem sprecyzowania wymogów odbiorowych konstrukcji,
- zakresu zmienności przemieszczeń konstrukcji z deformacjami pod wpływem obciążenia.

Nadrzędnym celem niniejszej pracy była próba oszacowania wpływu deformacji na stan wyężenia głównego elementu zbiornika - płaszcza.

### 3. Zakres pracy

Niniejsza praca została ograniczona do stalowych zbiorników walcowych, o osi pionowej, z dachami pływającymi (rys. 4.1). Wszelkie analizy oparto na powykonawczych, geodezyjnych pomiarach geometrii płaszczy rzeczywistych zbiorników zrealizowanych w Polsce w latach dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku. Materiał pomiarowy dotyczył głównie zbiorników o pojemności 50.000 m<sup>3</sup>.

Przyjęte schematy obliczeniowe oraz poprawności rozwiązań numerycznych zweryfikowane zostały na podstawie terenowych badań tensometrycznych wykonanych na rzeczywistym, wycofanym z eksploatacji, zbiorniku tego samego typu, lecz o pojemności 12.000 m<sup>3</sup>.

W ramach niniejszej pracy podjęto próbę opracowania następujących zagadnień:

- analiza statystyczna rzeczywistych odchyłek kształtu walcowych płaszczy zbiorników,
- analiza numeryczna wpływu deformacji płaszcza na stan naprężeń w powłokach walcowych każdego z analizowanych zbiorników,
- analiza wpływu typowych, wyizolowanych i dokładnie zdefiniowanych, pojedynczych odchyłek geometrycznych na stan naprężeń w powłokach walcowych,
- zalecenia dotyczące wartości dopuszczalnych odchyłek wykonawczych i eksploatacyjnych dla konstrukcji zbiornikowych, ze szczególnym uwzględnieniem zbiorników z dachami pływającymi.

W pracy nie poruszono spraw deformacji i uszkodzeń płaszczy zbiorników wywołanych w czasie eksploatacji powstałych pod wpływem podciśnienia lub też nadciśnienia (obciążenie takie nie występuje bowiem w zbiornikach z pływającym dachem). Nie analizowano zagadnień związanych z nierównomiernym osiadaniem zbiornika na obwodzie.

### 4. Konstrukcja zbiorników

Zasadniczymi elementami konstrukcji analizowanego typu zbiornika jest stalowe dno oraz płaszcz (rys. 4.1). Dno zbiornika składa się z dwóch części: środkowej i pierścienia obrzeżnego. Część środkowa stalowego dna, jest wykonana z blach grubości 8 mm. Blachy te są ułożone bezpośrednio na fundamencie piaskowym. Ta część dna zbiornika jest otoczona pierścieniem obrzeżnym, z blach grubości 16 mm. Pierścień ten spoczywa na fundamencie piaskowym w swojej części wewnętrznej, na obwodzie - na żelbetowym pierścieniu fundamentowym (rys. 4.2). Blachy dna są łączone w stykach poprzecznych spoinami czołowymi z zastosowaniem podkładek, styki podłużne są wykonane na zakładkę z zastosowaniem spoin pachwinowych. Część środkowa dna zbiornika jest łączona z pierścieniem obrzeżnym na zakładkę spoiną pachwinową. Dno zbiornika wykonano z dwóch gatunków stali: część środkową ze stali niestopowej znaku S235J0 (St3SY), a część zewnętrzną - ze stali niskostopowej znaku S355K2G3 (18G2A.)

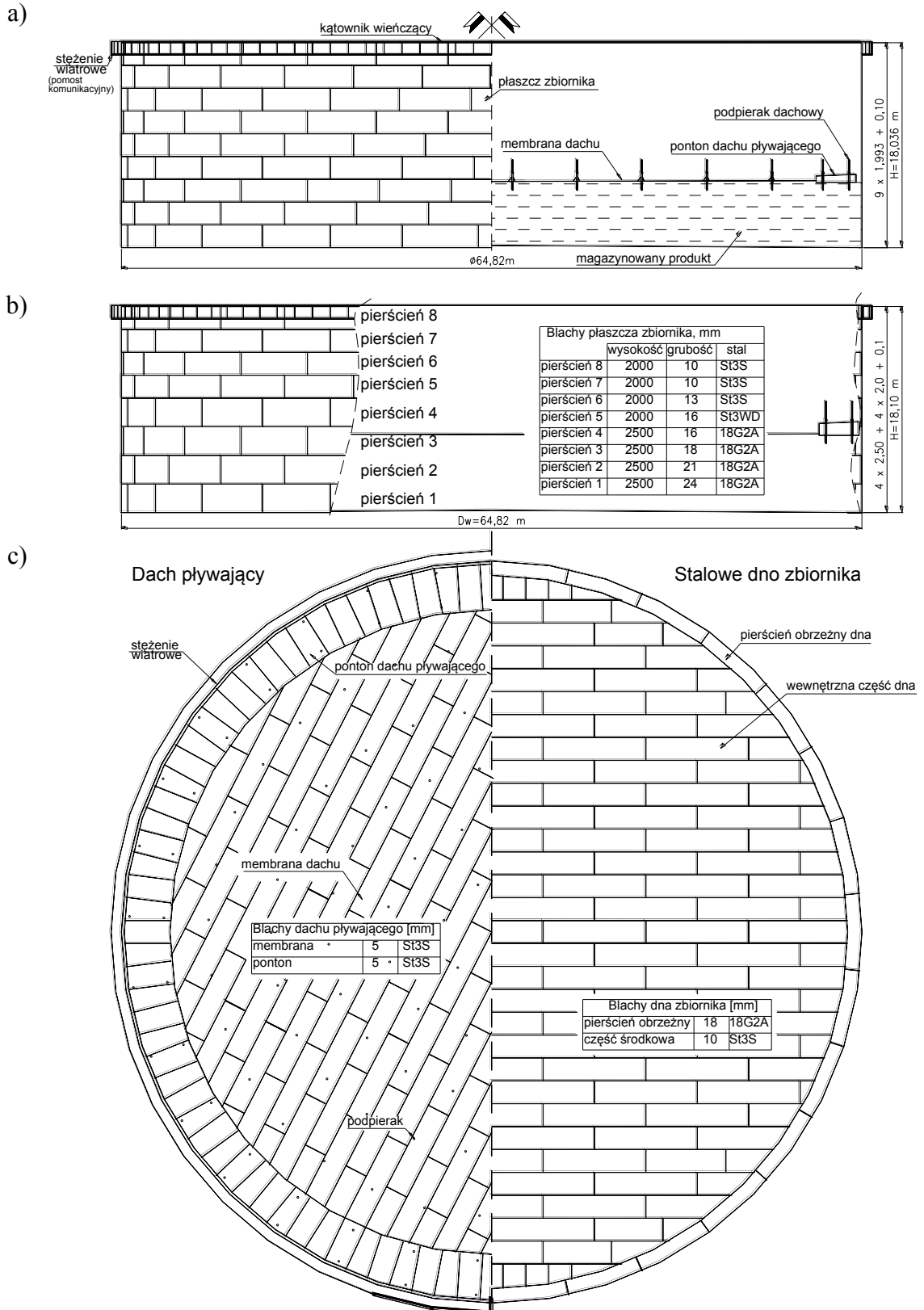
Płaszcz zbiornika jest wykonany z pierścieni stalowych, na które wykorzystano stal:

- niskostopową znaku S355K2G3 (18G2A) - na cztery dolne pierścienie płaszcza,
- niestopową znaku S235J0 (St3S) - na wyższe pierścienie płaszcza.

Płaszcz składa się z ośmiu lub dziewięciu pierścieni (w zależności od okresu budowy zbiornika) o skokowo zmiennej grubości blach dostosowanej do liniowego rozkładu obciążenia. Liczba pierścieni zależy od przyjętej szerokości stosowanych arkuszy blach, ograniczonej: możliwościami technologicznymi przemysłu hutniczego, założeniami projektowymi oraz techniczno-organizacyjnymi robót montażowych. Grubości arkuszy blach poszczególnych pierścieni przedstawiono na rysunku (rys. 4.1). Blachy płaszcza są łączone spoinami czołowymi zarówno w stykach pionowych, jak i poziomych. Połączenie pomiędzy płaszczem a dnem wykonano z zastosowaniem obustronnej spoiny pachwinowej. Płaszcz zbiornika zwieńczono w górnej części kątownikiem 100×100×10 mm, w celu usztywnienia krawędzi swobodnej. Ważnym elementem omawianego typu zbiornika jest stężenie wiatrowe. Spełnia ono szczególnie istotną rolę wówczas, gdy dach pływający znajduje się w najniższym możliwym położeniu, czyli przy pustym zbiorniku. Stężenie wiatrowe jest montowane na ostatnim pierścieniu płaszcza zbiornika, w odległości 1,1 m

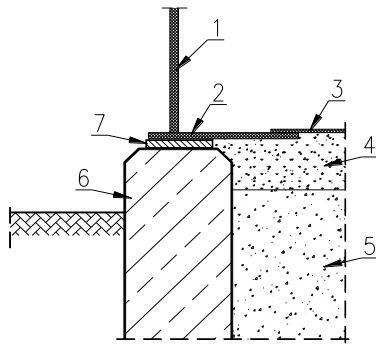
od jego krawędzi górnej. Stężenie to, spawane z blach, jest wykorzystywane przez obsługę jako pomost komunikacyjny.

Występują również inne elementy konstrukcji określane jako wyposażenie technologiczne. Można tu wymienić: włazy - wejściowe, wyczystkowe, wentylacyjne, króćce - produktowe, pomiarowe, oraz elementy zapewniające odpowiednie ciągi komunikacyjne – schody, drabiny, pomosty.



Rys. 4.1. Konstrukcja analizowanych zbiorników:

a) schemat zbiornika z dachem pływającym, b) płaszcz z 8 pierścieniami poziomymi, c) dach pływający i dno,



Rys. 4.2. Sposób posadowienia obiektu na poduszce piaskowej i pierścieniu żelbetowym,

1- płaszcz zbiornika, 2 – stalowy pierścień obrzeżny dna, 3 – wewnętrzna część dna stalowego, 4 – poduszka piaskowa nasączona olejem, 5 – fundament żwirowo – piaskowy, 6 – pierścień żelbetowy, 7 – elastyczna przekładka

## 5. Imperfekcje geometryczne powłok

Występujące imperfekcje płaszczy zbiorników walcowych można podzielić na dwie grupy. Pierwsza to defekty, które powstają w okresie budowy zbiornika i są zawinione przez wykonawców obiektu – zaliczyć do nich można:

- wadliwe wykonanie elementów konstrukcyjnych w wytwórni,
- niewłaściwy transport i magazynowanie,
- nieprawidłowe przygotowanie konstrukcji do spawania,
- nieprzestrzeganie prawidłowej technologii montażu i spawania w trakcie realizacji prac montażowych.

Drugie powstają w okresie eksploatacji a powodowane są przez takie czynniki jak:

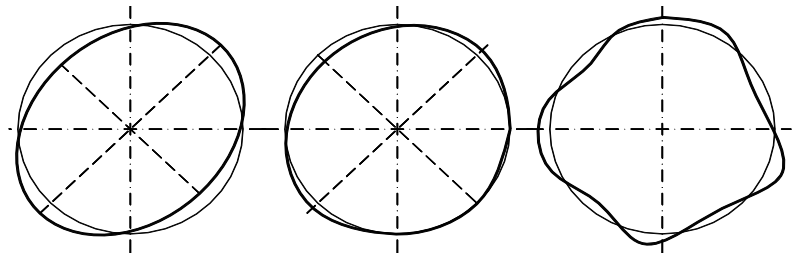
- osiadanie obiektu,
- oddziaływania przyłączy rurociągowych na powłokę walcową zbiornika,
- postęp korozji powodującej w konsekwencji zmianę redystrybucji sił wewnętrznych,
- prace remontowe i modernizacyjne z wykorzystaniem technik spawalniczych.

Ogólne przykłady defektów geometrycznych powłok walcowych występujących w rzeczywistych obiektach przedstawiono na rysunkach zamieszczonych obok.

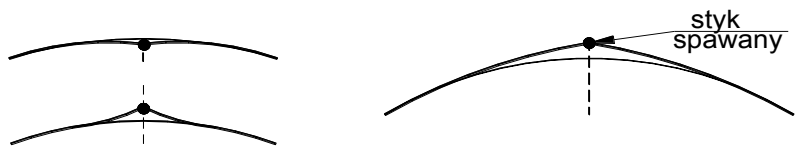


Rys. 5.1. Odształcenia ogólne formy zbiornika

a) przechylenie walcowej poboczniczy zbiornika,  
b) stożkowy przebieg powierzchni poboczniczy



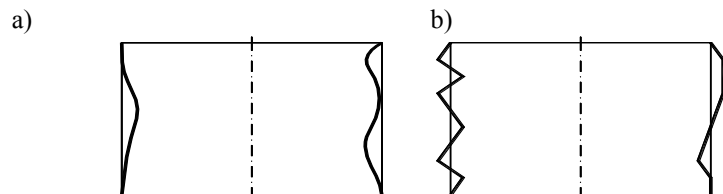
Rys. 5.2. Owalizacja przekroju na poszczególnych poziomach



Rys. 5.3. Deformacje kątowe spawanych styków pionowych blach tworzących pierścień

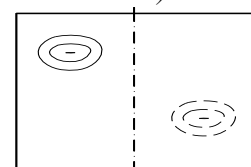


Rys. 5.4. Deformacje kątowe spawanych styków poziomych



Rys. 5.5. Imperfekcje tworzącej powłoki walcowej

a) falisty przebieg tworzącej płaszczy,  
b) lokalne odchylenia blach od tworzącej



Rys. 5.6. Lokalne wgłębienie lub wypukłość

## 6. Przegląd literatury

Tematyka niniejszej dysertacji choć ograniczona została na wstępie do analizy zachowania się płaszcza zbiornika pod wpływem wstępnych imperfekcji geometrycznych to z powodu złożoności problemu obejmuje swoim zakresem różne obszary badawcze oraz eksploatacyjne obiektu. Wśród różnych dziedzin nauki, prac badawczo-rozwojowych oraz zagadnień eksploatacyjnych można wyróżnić takie jak: geodezyjne pomiary geometrii, analizy statystyczne różnych wartości pomierzonych jak i obliczonych, analiz numerycznych metodą elementów skończonych, analiz statyczno - wytrzymałościowych, zagadnień zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa, aż po problemy praktycznego projektowania, konstruowania, utrzymania i remontów obiektów w trakcie eksploatacji.

Rozkład sił wewnętrznych w płaszczu zbiornika zależy nie tylko od analizowanych w pracy imperfekcji geometrycznych, ale także od wielu innych czynników. Łączne zmiany rozkładu sił spowodowane interferencjami mają wpływ na stan bezpieczeństwa obiektu. Z tego powodu w niniejszym rozdziale oprócz przedstawienia literatury dotyczącej wyłącznie analiz imperfekcji geometrycznych przedstawiono literaturę na temat innych czynników i analiz obejmujących swym zakresem stan naprężeń w płaszczu zbiornika. Dla pewnej systematyki tego rozdziału cytowana literatura została pogrupowana na kilka oddzielnych bloków tematycznych:

1. Podstawy projektowania zbiorników,
2. Metody obliczeń idealnych powłok walcowych
3. Stateczność powłoki walcowej
4. Zagadnienia eksploatacyjne, a w tym:
  - a) osiadanie zbiorników,
  - b) wady spoin, zmęczenie, kruche pęknięcie, korozja,
  - c) imperfekcje płaszczy zbiorników,
  - d) losowe rozkłady imperfekcji geometrycznych
5. Remonty zbiorników
6. MES w analizie powłok z defektami kształtu
7. Normy odbioru konstrukcji zbiornikowych.

## 7. Badania tensometryczne walcowej powłoki płaszcza

Wiosną 2000 roku wykonano badania tensometryczne zmiany stanu naprężeń w stalowej powłoce walcowej zbiornika magazynowego o pojemności 12.000 m<sup>3</sup>. Deformacje geometryczne płaszcza zbiornika były znaczne, co zilustrowano zestawem wykresów: obwiedni imperfekcji geometrycznych powłoki (rys 7.1, 7.2), oraz zestawieniami statystycznymi (rys. 7.3, 7.4). Przy zastosowaniu standaryzowania z wykorzystaniem rzeczywistych grubości blach płaszcza zbiornika uzyskujemy następujące krotności:

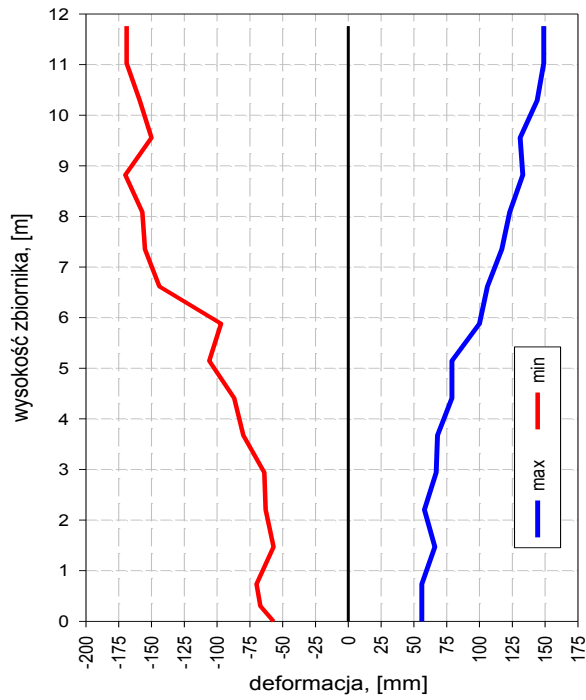
- odchyłka ujemna (do wnętrza zbiornika) od 3,4 do 28,3 krotność grubości blachy,
- odchyłka dodatnia (na zewnątrz zbiornika) od 3,3 do 24,0 krotność grubości blach.

Uzyskane w trakcie pomiarów tensometrycznych wartości naprężeń obwodowych pomierzone na trzech pionach pomiarowych badanego zbiornika przedstawiono graficznie na wykresie (rys. 7.5).

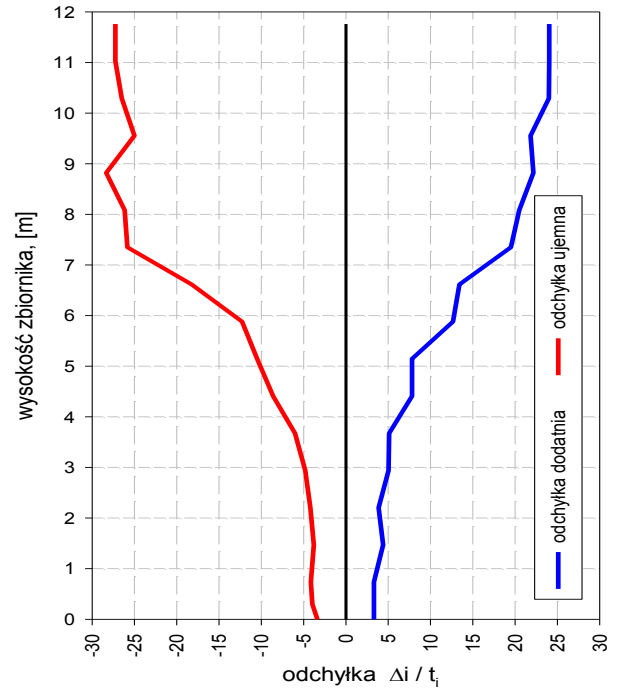
## 8. Stan deformacji płaszczy zbiorników

Deformacje płaszczy analizowanej grupy zbiorników określono na podstawie geodezyjnych pomiarów zbiorników przekazywanych do eksploatacji. Pomiary wykonano na 40 pionach pomiarowych, równomiernie rozmieszczonych na obwodzie zbiornika. W każdym pionie pomiarowym dokonano pomiaru w połowie wysokości każdego pierścienia oraz na poziomie obwodowych styków spawanych pomiędzy poszczególnymi pierścieniami. Pomiary wykonano w trzech fazach, odpowiadających następującym etapom kontroli jakości geometrycznej wykonania płaszczy:

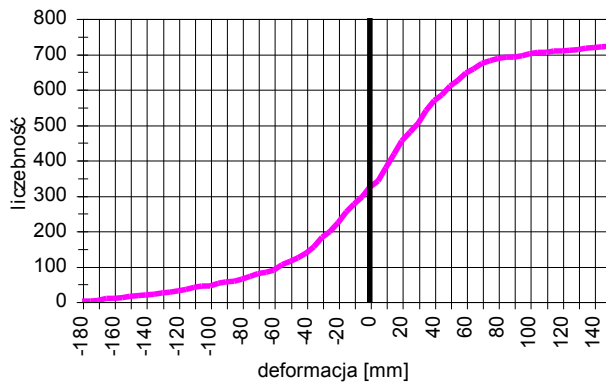
- bezpośrednio po zakończeniu prac montażowych,
- w czasie próby wodnej - zbiornik wypełniony był wodą do poziomu eksploatacyjnego,
- po zakończeniu próby wodnej - po jednokrotnym napełnieniu i opróżnieniu zbiornika.



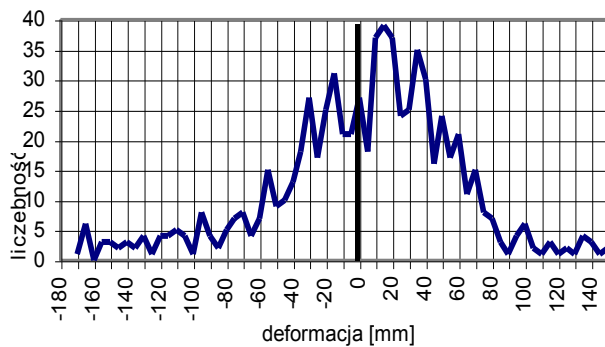
Rys. 7.1. Maksymalne wartości imperfekcji płaszcza zbiornika



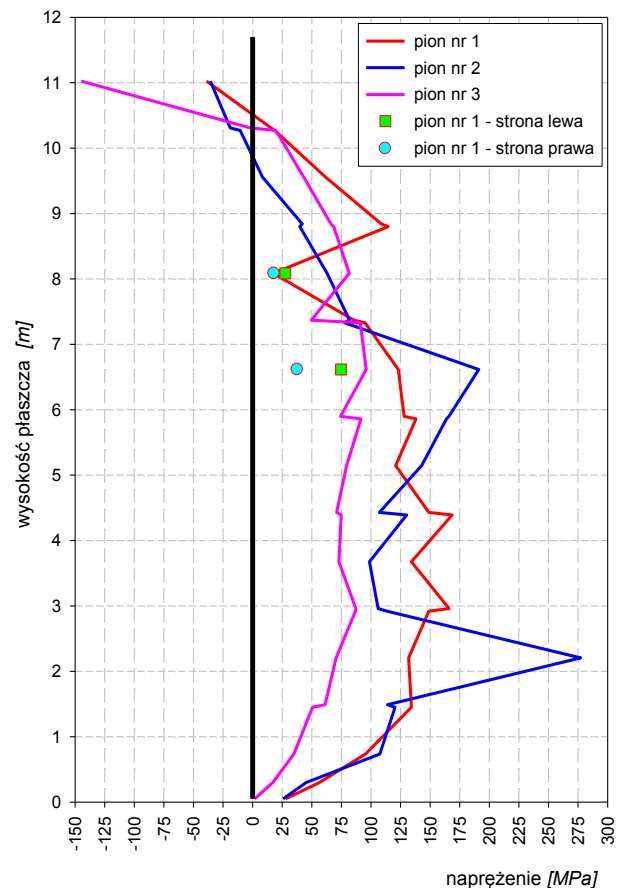
Rys. 7.2. Standaryzowana grubością blach płaszcza wielkość imperfekcji



Rys. 7.3. Sumaryczna częstość deformacji płaszcza zbiornika



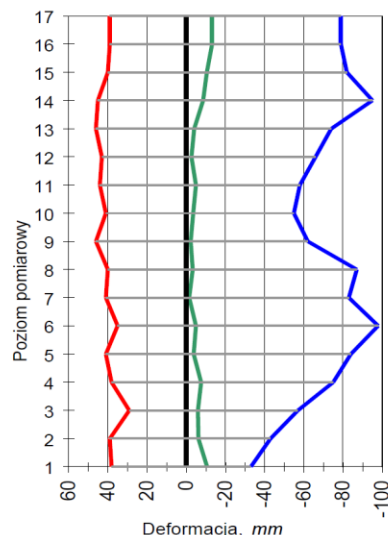
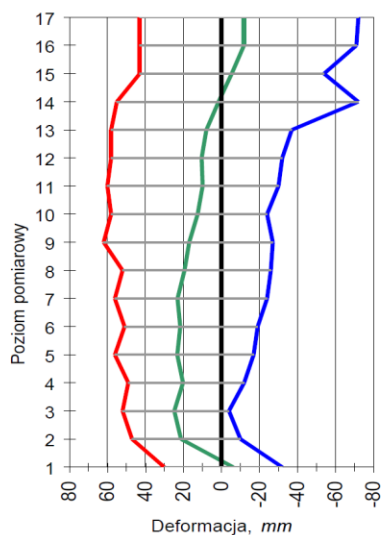
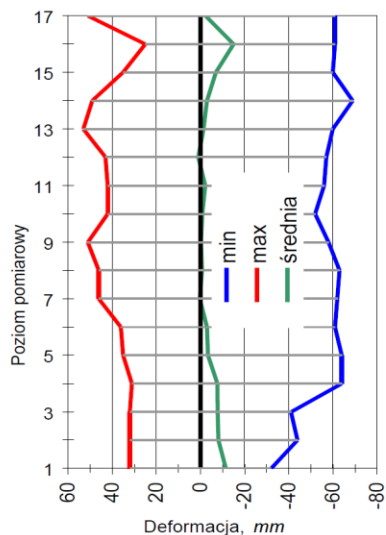
Rys. 7.4. Częstość deformacji płaszcza zbiornika



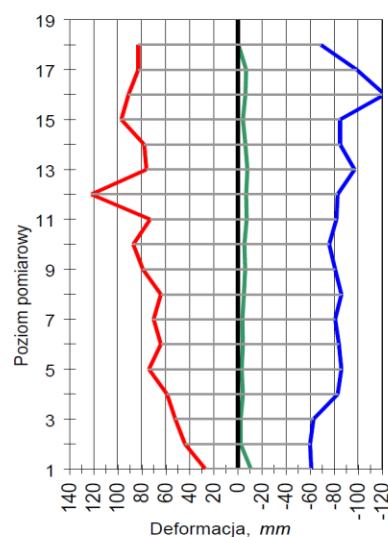
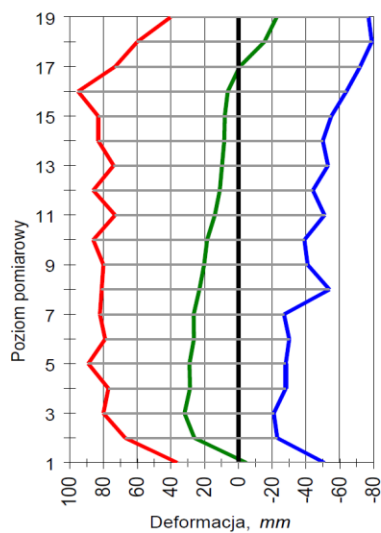
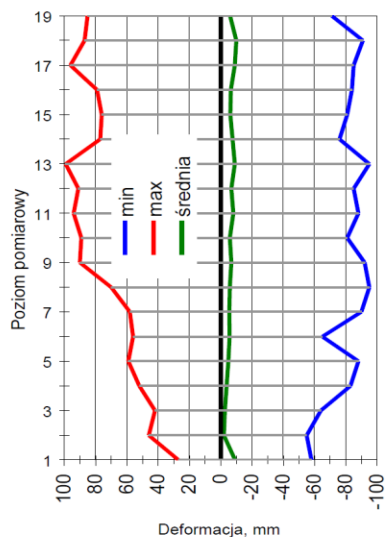
Rys. 7.5. Zestawienie maksymalnych wartości naprężeń pomierzonych

W niniejszej pracy wykorzystano wyniki pomiarów 12 nowych zbiorników oraz jednego zbiornika eksploatowanego ponad 20 lat. Na rysunku 8.1 przedstawiono obwiednie geometrycznych imperfekcji płaszczy zbiorników. Wartości tych obwiedni podano jako odchyłki od zakładanej w projekcie geometrii idealnej. Prezentowane wartości zostały zgrupowane ze względu na niewielkie różnice czasu budowy (grupy „1-6”, „7-12”) oraz okresu wykonania pomiarów („13”).

**Grupa zbiorników "1-6"**



**Grupa zbiorników "7-12"**

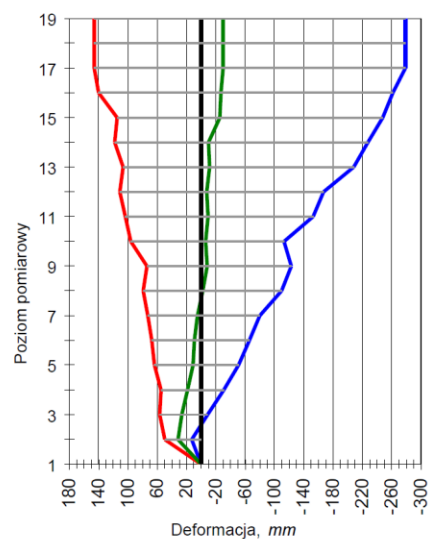


a) po montażu

b) podczas próby

c) po próbie

**Zbiornik "13"**



d) zbiornik po około 20 latach eksploatacji

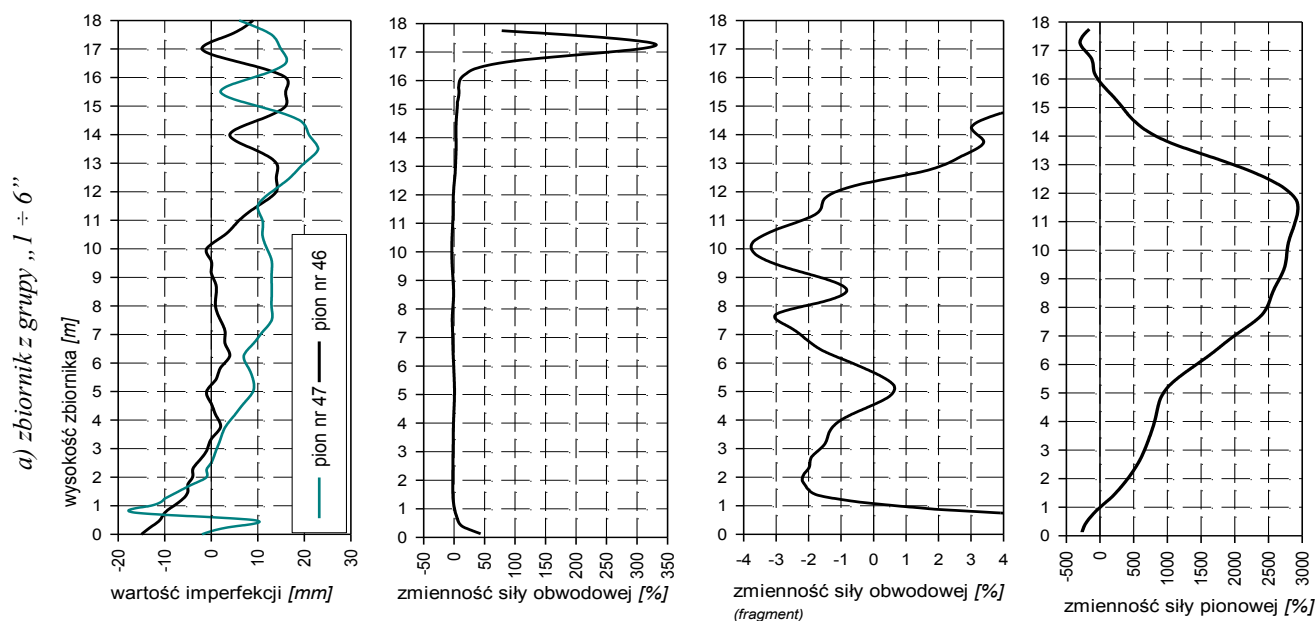
Rys. 8.1. Obwiednie imperfekcji geometrycznych płaszczy zbiorników



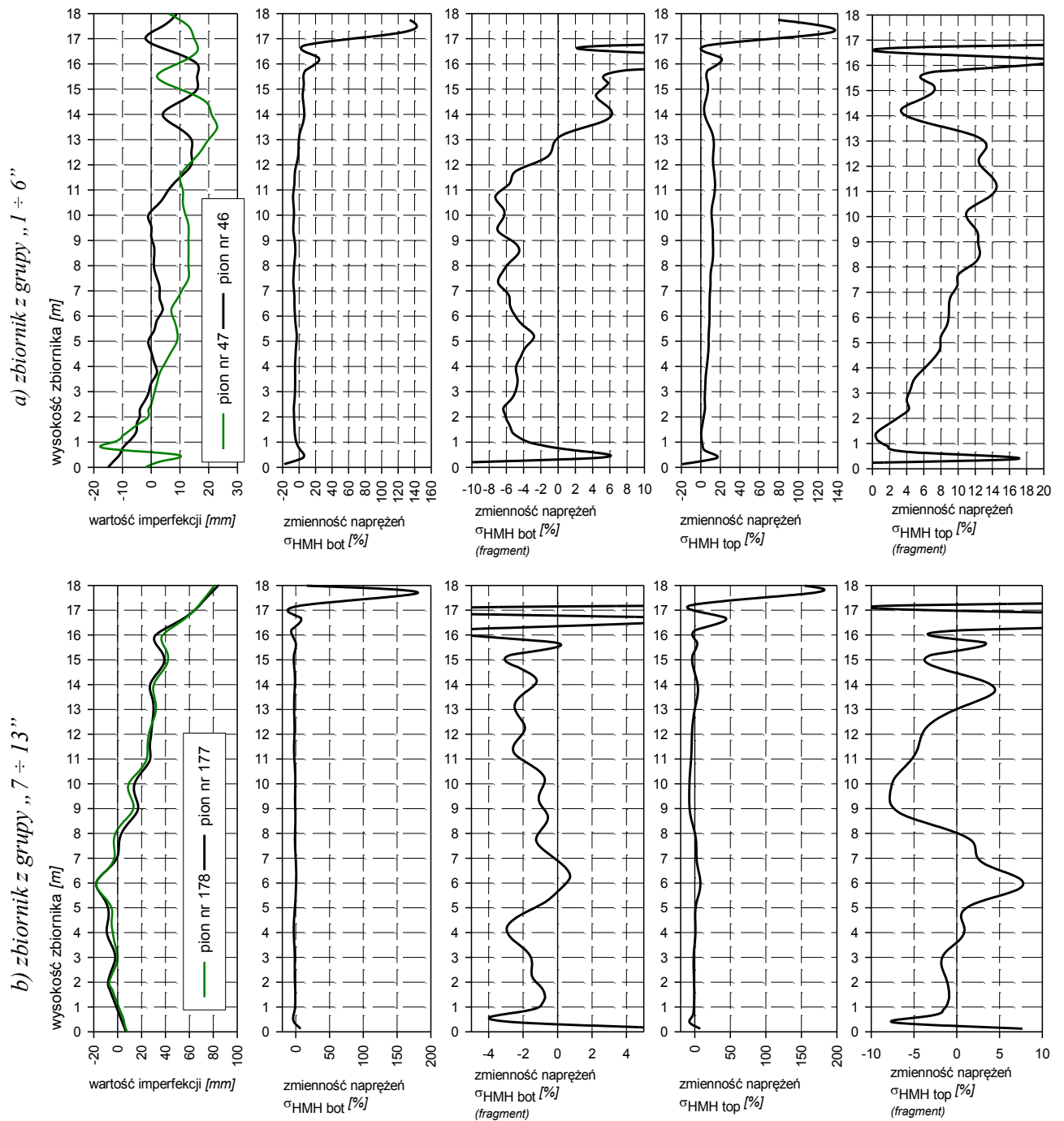
## 9. Obliczenia numeryczne zbiorników z imperfekcjami

Analizę numeryczną zdeformowanych powłok płaszczy zbiorników przeprowadzono wykorzystując pakiet obliczeniowy MSC.NASTRAN. Na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych i specjalnie opracowanego autorskiego programu komputerowego wygenerowano kompleksowe numeryczne modele obiektów rzeczywistych. Uwzględniono specyficzne warunki niedoskonałości geometrycznych powłoki płaszcza oraz oparcie na fundamencie o skokowo zmiennej sztywności. Komputerowy model zbiornika składał się z dwustu tworzących, rozmieszczonych równomiernie na obwodzie. Współrzędne brakujących węzłów pośrednich określono na podstawie interpolacji pomiędzy wartościami znanymi z pomiarów geodezyjnych. Do modelowania konstrukcji użyto izoparametrycznych elementów czterowęzłowych typu płytowego, w których równania opisują cechy stanu tarczowego i giętnego (QUAD4). Analizowane modele obciążano odwzorowywanym parciem hydrostatycznym cieczy na powierzchnie wewnętrzne płaszcza oraz dno zbiornika. Modelowany poziom cieczy w zbiornikach wynosił 17 m i odpowiadał poziomowi cieczy w trakcie eksploatacji. W analizach wytrzymałościowych uwzględniono wartości charakterystyczne obciążeń.

Analizę zmienności rozkładu sił wewnętrznych oraz wynikających stąd zmian rozkładu naprężeń przeprowadzono oddzielnie do każdego zbiornika. Imperfekcje geometryczne zbiornika oraz ich wpływ na analizowane stany potraktowano globalnie w celu określenia obwiedni poszukiwanych wielkości statycznych i wytrzymałościowych. Analiza indywidualna każdej pojedynczej imperfekcji czy też każdego pionu lub poziomu na stan zbiornika jest bardzo trudna z powodu różnego ukształtowania otoczenia danej wady geometrycznej. Aby to zobrazować przedstawiono przykładowe zestawienia rozkładów sił wewnętrznych (rys. 9.1) oraz naprężeń (rys. 9.2) w losowo wybranym zbiorniku. Pionowe pasmo podziału elementowego płaszcza zbiornika zostało dobrane w sposób losowy. W celu uchwycenia szczegółów zmienności analizowanych rozkładów, niektóre wielkości przedstawiono na dwóch wykresach. Na jednym zilustrowano cały zakres zmienności danej wielkości, na drugim jego fragment. Takie zestawienie pozwala na zobrazowanie zmienności analizowanych wielkości w układzie całego ich zakresu jak i wybranych fragmentów, które są słabo przedstawione na wykresie obejmującym pełen zakres zmienności prezentowanej wielkości. Stan deformacji powłoki odpowiadający warunkom geometrycznym na krawędziach pionowych wybranego pionowego pasma elementowego został przedstawiony jako pierwszy wykres. Krzywa koloru czarnego tego wykresu przedstawia warunki początkowe, druga, kolorowa- końcowe brzegowe warunki geometryczne siatki podziału elementowego wybranego pasma.



Rys. 9.1. Zakres zmienności siły obwodowej i pionowej dla wybranego pasma elementowego



Rys. 9.2. Zakres zmienności naprężeń zredukowanych wg hipotezy H-M-H dla wybranego pasma elementowego

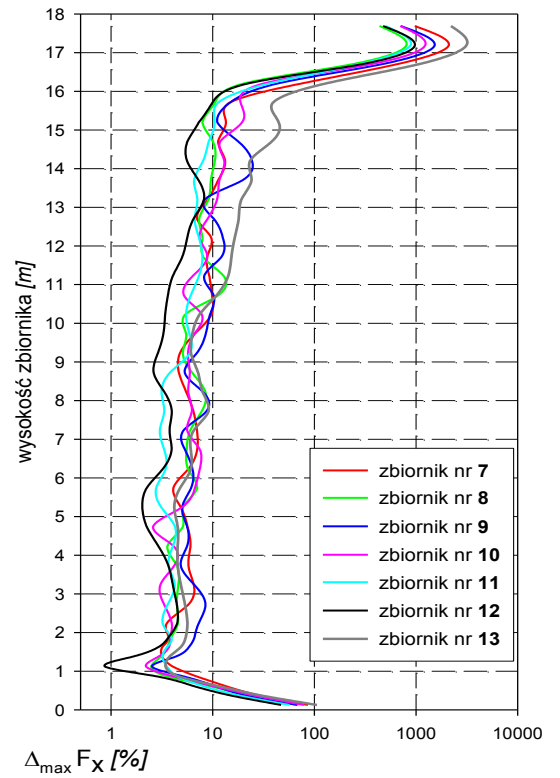
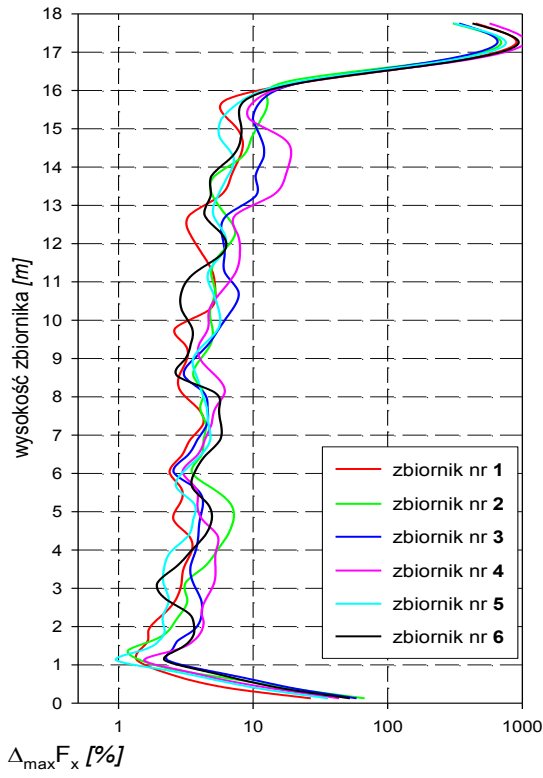
Ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji obiektu i rezerwy nośności konstrukcji ważna jest wartości przyrostu analizowanych sił wewnętrznych oraz naprężeń  $\Delta_{\text{max}} X$  ponad wartość określoną dla konstrukcji bez imperfekcji (rys. 9.3, 9.4, 9.5).

$$\Delta_{\text{max}} X = \left[ \frac{(X_{\text{max}} - X_{\text{wzór}})}{X_{\text{wzór}}} \right] \cdot 100\% \quad (1)$$

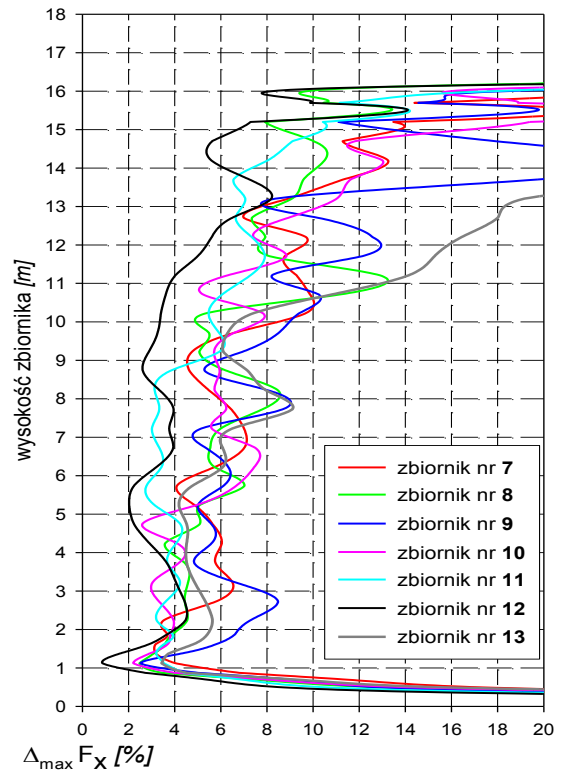
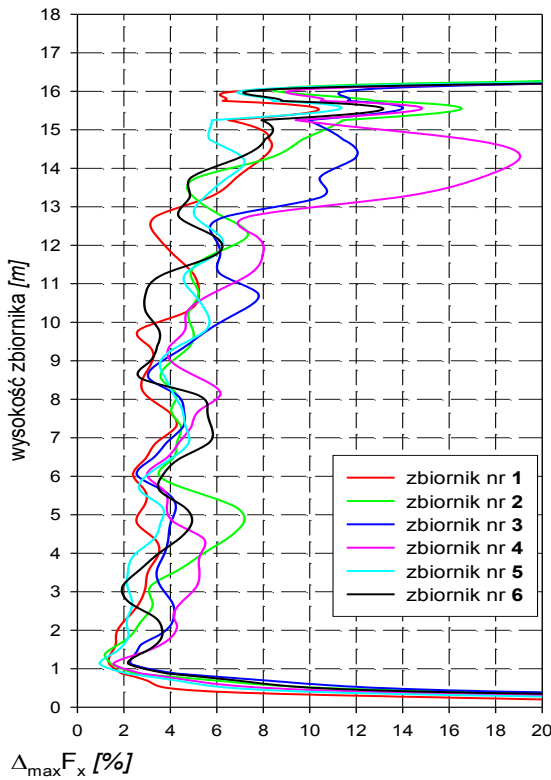
w którym:

$X_{\text{max}}$  – maksymalna wartość analizowanej wielkości statycznej określonej na poszczególnych obliczeniowych poziomach,

$X_{\text{wzór}}$  – wartość wzorcowa na poszczególnych poziomach obliczeniowych dotycząca zbiornika bez imperfekcji geometrycznych,

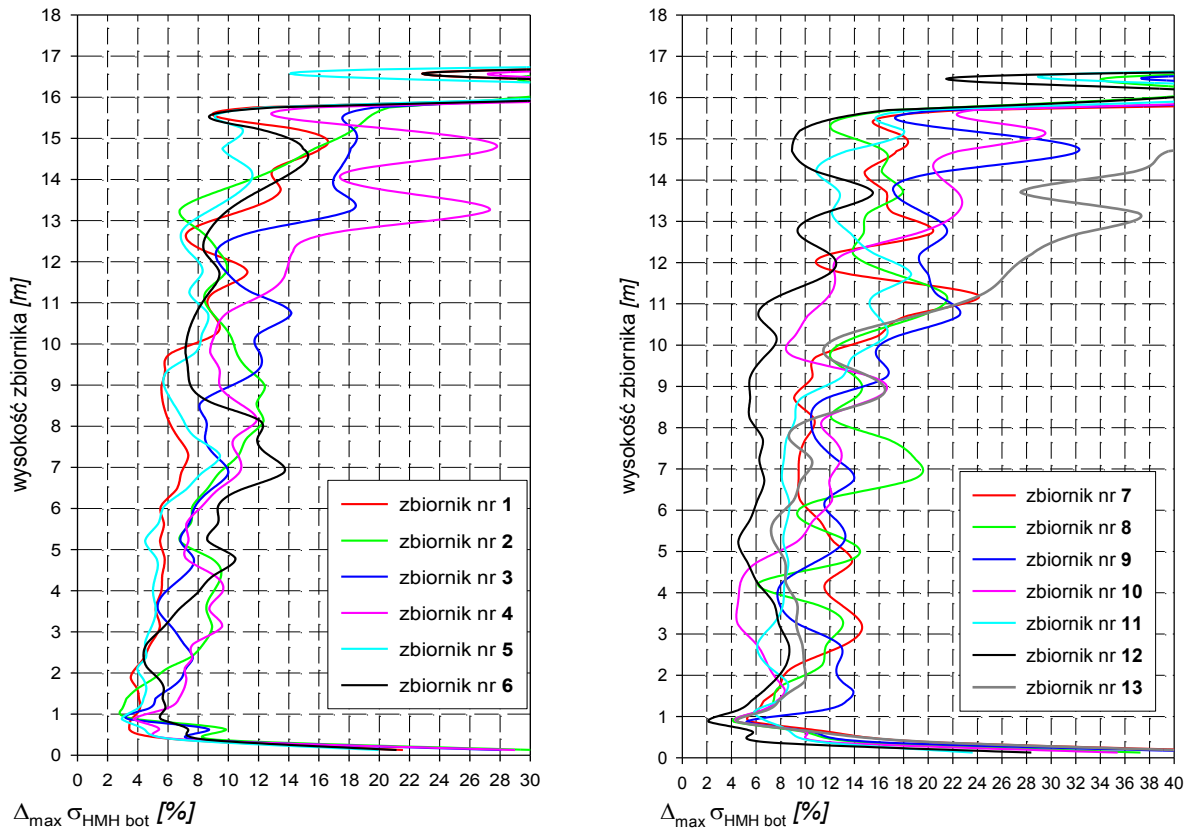


a) w skali logarytmicznej

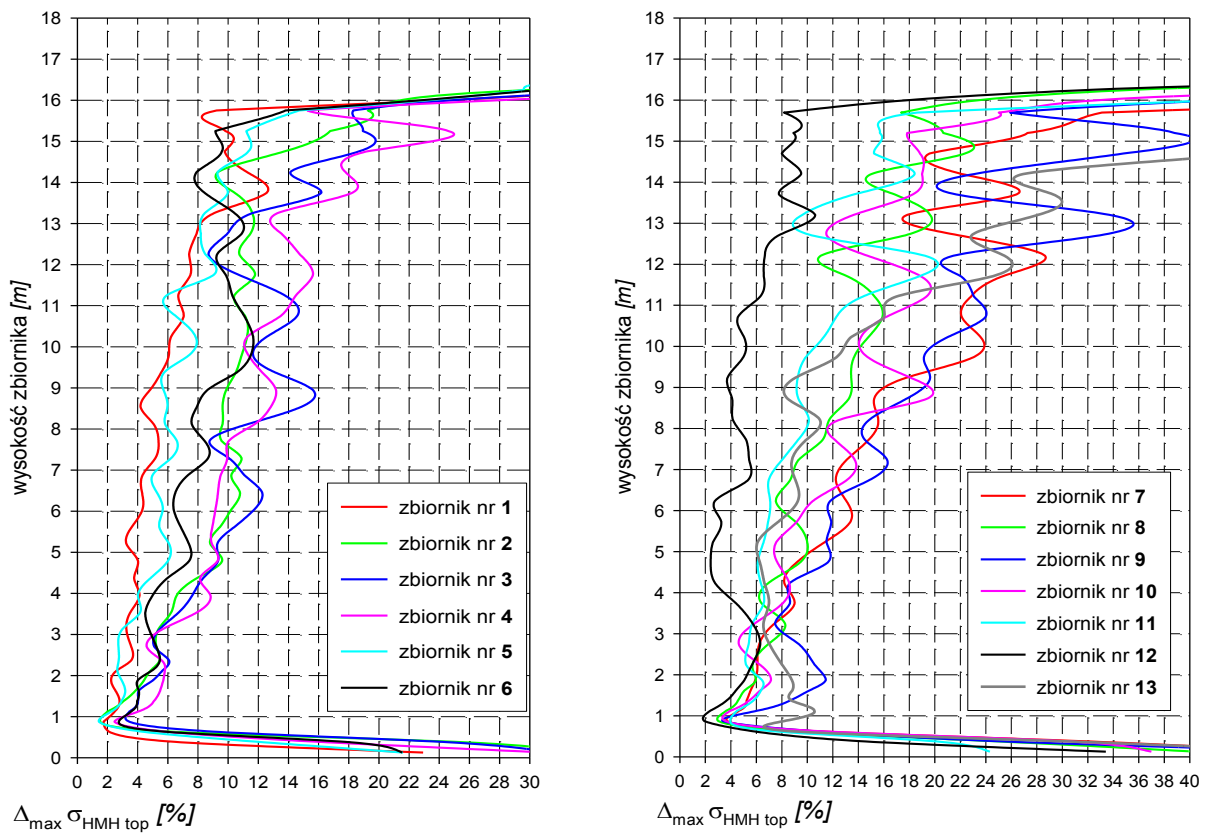


b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.3. Maksymalny wzrost siły obwodowej  $F_x$



Rys. 9.4. Obwiednia maksymalnego wzrostu naprężeń zredukowanych wg hipotezy HMH – na zewnętrznej powierzchni płaszczu zbiornika

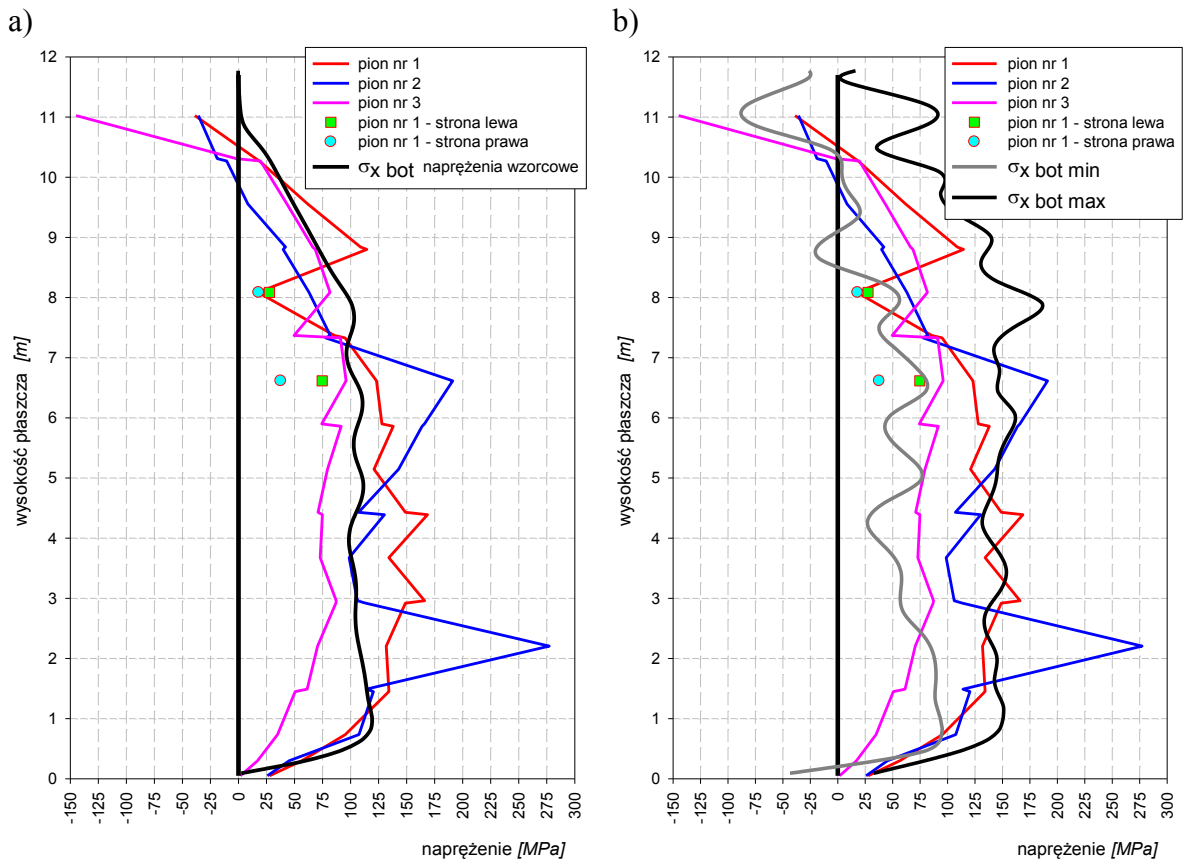


Rys. 9.5. Obwiednia maksymalnego wzrostu naprężeń zredukowanych wg hipotezy H-M-H – na wewnętrznej powierzchni płaszczu zbiornika

Można stwierdzić, że zwiększenie sił obwodowych o wartościach maksymalnych 8-12%, nie przekłada się wprost na jednakowe zwiększenie naprężeń obwodowych i zredukowanych, który w przypadku naprężeń obwodowych mieści się w granicach 12-25% w przypadku grupy zbiorników oznaczonej symbolem „1-6”. Druga grupa zbiorników, oznaczona symbolem „7-13”, charakteryzuje się większym przyrostem naprężeń obwodowych i zredukowanych.

Do weryfikacji wykonanej analizy numerycznej wykorzystano uzyskane wyniki badań tensometrycznych zbiornika pojemności  $V=12000\text{ m}^3$ . Zbiornik ten charakteryzował się znacznymi imperfekcjami kształtu płaszcza. Badania potwierdziły zróżnicowanie naprężeń w płaszczu zbiornika, występujące na poszczególnych poziomach pomiarowych, a także prawidłowość przeprowadzenia analiz numerycznych.

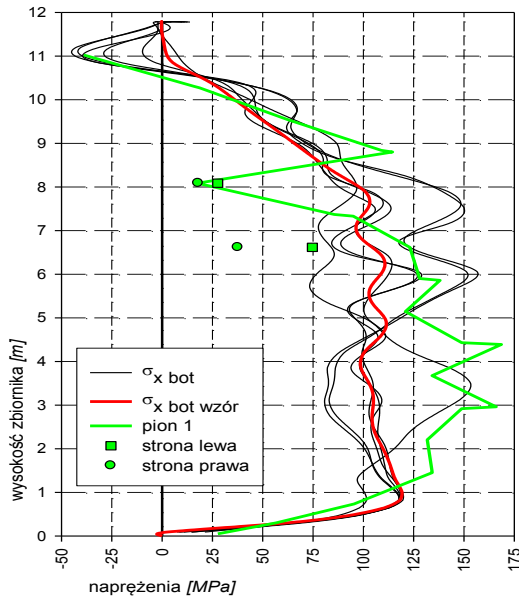
Poniższe wykresy przedstawiają zestawienia wartości uzyskanych z badań oraz analiz numerycznych (rys. 9.6, 9.7).



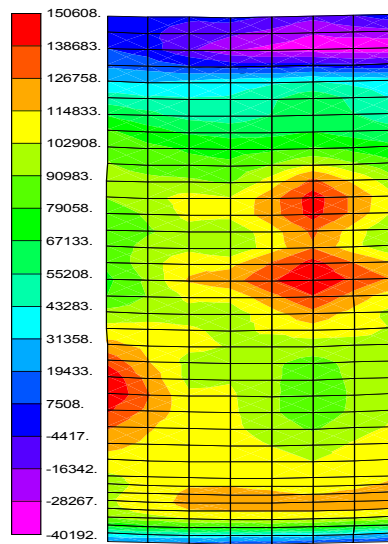
Rys. 9.6. Porównanie wartości naprężeń zmierzonych w teście z obliczonymi numerycznie

a) porównanie naprężeń w płaszczu zbiornika rzeczywistego (badanego) z wartościami naprężeń określonymi numerycznie w płaszczu zbiornika o idealnym kształcie,

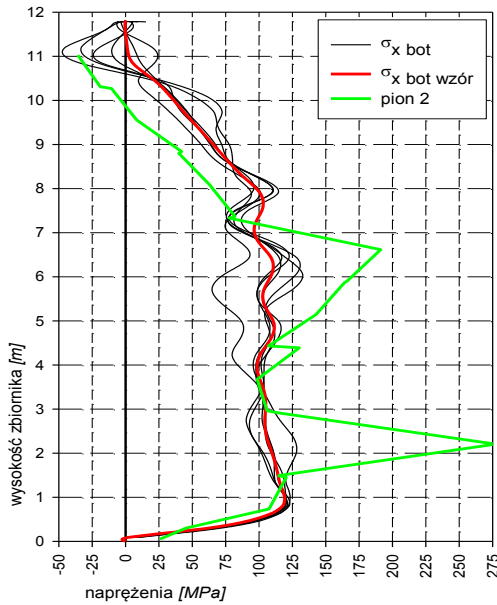
b) porównanie naprężeń w płaszczu zbiornika rzeczywistego (badanego) z wartościami obwodni naprężeń określonymi numerycznie dla płaszcza zbiornika z rzeczywistymi imperfekcjami geometrycznymi



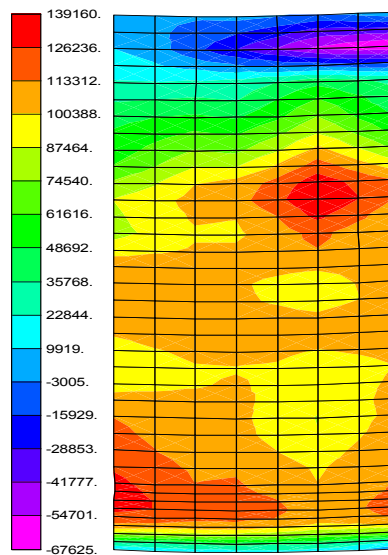
a) naprężenia obwodowe w obszarze pomiarowym pionu nr 1



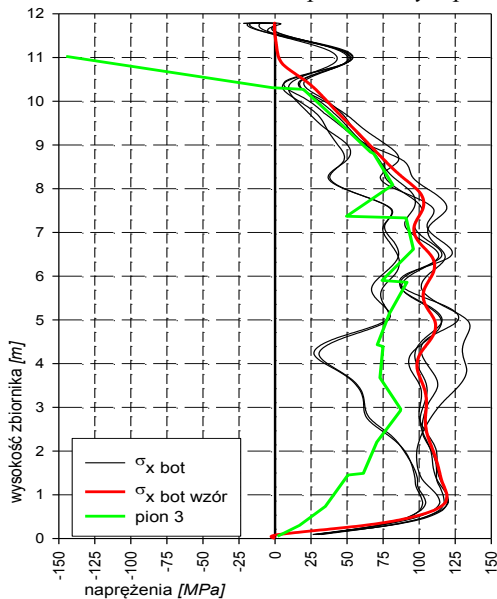
b) mapa rozkładu naprężeń [kPa] w rejonie pionu nr 1



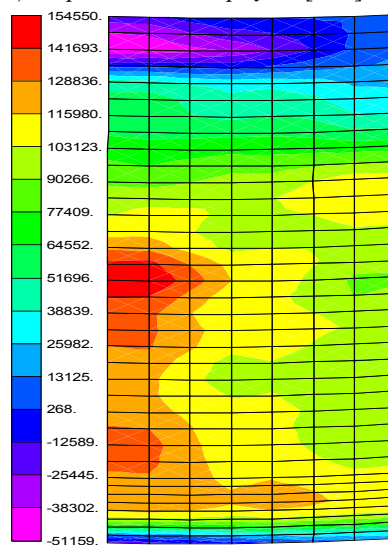
c) naprężenia obwodowe w obszarze pomiarowym pionu nr 2



d) mapa rozkładu naprężeń [kPa] w rejonie pionu nr 2



e) naprężenia obwodowe w obszarze pomiarowym pionu nr 3



f) mapa rozkładu naprężeń [kPa] w rejonie nr 3

Rys. 9.7. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami badania tensometrycznego



## 10. Podsumowanie

Analizy przeprowadzone w pracy pozwalają na następujące wnioski:

- a) Imperfekcje geometryczne wpływają na stan zmienności wszystkich sił wewnętrznych a tym samym na zmienność naprężeń w powłoce walcowej zbiornika. Jak wykazano na powłokach testowych oraz na analizowanych rzeczywistych zbiornikach wpływ imperfekcji na wartości tych zmian jest odwrotnie proporcjonalny do promienia krzywizny powłoki płaszcza zbiornika, tzn. dla konstrukcji o mniejszych wymiarach wpływy zmian są dużo większe niż dla konstrukcji o większych wymiarach.
- b) Podział analizowanych zbiorników o pojemności 50 000 m<sup>3</sup> na dwie grupy, przyjęty w pracy (grupy oznaczone numerami „1-6” i „7-13”), określony został nie tylko na podstawie pewnych różnic w budowie, ale szczególnie na podstawie analizy statystycznej rzeczywistych wartości imperfekcji geometrycznych. Podział ten okazał się słusznym i został potwierdzony w dalszej części pracy. Wykonane analizy numeryczne potwierdziły, iż znacznie większe imperfekcje powłok walcowych powodują większe ilościowe i jakościowe rozrzuty wartości wielkości statycznych oraz wytrzymałościowych.
- c) Obwiednie wartości naprężeń zarówno obwodowych jak i zredukowanych określone dla przeanalizowanych rzeczywistych zbiorników o pojemności 50 000 m<sup>3</sup> pozwalają stwierdzić, iż nie występują przypadki przekroczenia wartości naprężeń obliczeniowych, dla odpowiednich gatunków stali. Bezpieczeństwo eksploataowania obiektów jest zachowane przy działaniu obciążenia o wartości charakterystycznej. Analizy przeprowadzone przy uwzględnieniu wody jako medium wypełniającym zbiorniki (etap próby przed przekazaniem zbiornika do eksploatacji), przy uwzględnieniu nadtaków korozyjnych, wykazują około 18% zapas nośności w odniesieniu do wartości maksymalnych odczytanych z obwiedni. Minimalna wartość wzrostu obciążenia obliczeniowego w stosunku do jego wartości charakterystycznej wynosi 15,5%, wynika to z iloczynu wymaganych normami obliczeniowych współczynników obciążenia cieczą wypełniająca o wartości 1,1 oraz konsekwencji zniszczenia - w przypadku wody o wartość 1,05.  
W przypadku magazynowania ropy naftowej iloczyn wartość obliczeniowych współczynników obciążenia, z uwzględnieniem różnicy ciężarów cieczy, jest znacznie większy i wynosi minimum 40,4%. Tak duża wartość współczynników obliczeniowych daje znaczny zapas nośności konstrukcji również z uwzględnieniem wpływu dużych imperfekcji geometrycznych. Przykładem tego mogą być zbiorniki z grupy oznaczonej numerami „7-13”.
- d) Wartości dopuszczalnych odchyłek odbiorowych dotyczących geometrii płaszcza zbiornika określone w polskiej normie są ustalone na bezpiecznym poziomie dla eksploatowanych obiektów. Potwierdzeniem tego faktu są właśnie wspomniane dwie grupy analizowanych rzeczywistych zbiorników różniących się znacznie wartościami imperfekcji. Dla grupy zbiorników oznaczona numerami „1-6”, która spełnia wymagania odbiorowe wspomnianej normy, wykazano na podstawie obliczeń zdecydowanie najmniejsze zmiany w rozkładzie sił wewnętrznych oraz naprężeń.
- e) Wartości dopuszczalnych imperfekcji geometrycznych podane w przepisach normowych są określone prawidłowo. Należy jednak wspomnieć, iż projekt nowej normy z serii Eurokod, dotyczącej powłok stalowych podaje sposób określenia jakości powłoki w formie bardzo uproszczonej. Wartości otrzymane na tej podstawie są bardzo liberalne. Warto nadmienić, że wszystkie analizowane w niniejszej pracy zbiorniki spełniają warunki wykonania konstrukcji w zakresie klasy A, określanej jako „wspaniała”.