



Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
Katedra Konstrukcji Metalowych



Praca doktorska

Temat:

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

Wykonał

mgr inż. Dariusz Kowalski

Promotor

prof. dr hab. inż. Jerzy Ziółko

Spis treści

TOM 1

Strona tytułowa	1
Spis treści	2
1. Wprowadzenie	4
2. Cel pracy	6
3. Zakres pracy	7
4. Omówienie konstrukcji analizowanego w pracy zbiornika	8
4.1. Konstrukcja fundamentu	8
4.2. Stalowa konstrukcja zbiornika	9
4.3. Metoda montażu	12
5. Imperfekcje geometryczne powłok walcowych	16
5.1. Rodzaje imperfekcji	16
5.2. Imperfekcje powstałe w fazie budowy zbiornika	19
5.3. Imperfekcje powstałe w fazie eksploatacji	21
6. Przegląd literatury	23
6.1. Podstawy projektowania zbiorników	23
6.1.1. Metody obliczeń dla powłok idealnych	24
6.1.2. Stateczność powłoki walcowej	25
6.2. Zagadnienia eksploatacyjne	27
6.2.1. Osiadanie zbiorników	27
6.2.2. Wady spoin, zmęczenie, kruche pęknięcia, korozja	28
6.2.3. Imperfekcje płaszczy zbiorników	29
6.2.4. Losowe rozkłady imperfekcji geometrycznych	32
6.3. Remonty zbiorników	32
6.4. MES w analizie powłok z defektami kształtu	32
6.5. Normy odbioru konstrukcji zbiornikowych	33
7. Badania tensometryczne walcowej powłoki płaszcza z deformacjami kształtu	36
7.1. Tensometryczna metoda pomiaru	36
7.2. Ogólna charakterystyka przedmiotu badań	37
7.3. Ocena deformacji powierzchni płaszcza zbiornika i źródła ich pochodzenia	38
7.4. Zakres i przebieg badań	39
7.5. Omówienie wyników badań terenowych	42
7.5.1. Ograniczenia przeprowadzonego testu	45
8. Statystyka imperfekcji	46
8.1. Analityczne metody opisu statystycznego zbiorowości	47
8.2. Graficzne metody analizy	48
8.3. Analiza graficzna imperfekcji	48
8.4. Wnioski z analizy statystycznej	65
8.4.1. Wnioski z analizy graficznej	65
8.4.2. Wnioski z części analitycznej	67
8.4.3. Porównanie grup zbiorników	70
8.4.4. Analiza zbiorników o numerach 13 i 14	70
8.4.5. Podsumowanie	71

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 3
9.	Analiza numeryczne powłok z imperfekcjami	72
9.1.	Wykorzystywany aparat numeryczny	72
9.1.1.	Rodzaje stosowanych elementów numerycznych	73
9.1.2.	Parametry materiałowe	75
9.1.3.	Własności materiałowe	75
9.1.4.	Siatka podziału elementowego	76
9.1.5.	Opis modeli	77
9.1.6.	Obciążenie	80
9.1.7.	Metoda rozwiązania problemu numerycznego	80
9.2.	Powłoki testowe z imperfekcji	82
9.2.1.	Analiza doboru siatki podziału elementowego dla powłok testowych	91
9.3.	Powłoki rzeczywistych zbiorników	94
9.3.1.	Zbiornik będący przedmiotem badań tensometrycznych	116
10.	Wnioski	122
10.1.	Działania badawcze do dalszej realizacji	124
11.	Bibliografia	125
11.1.	Bibliografia do rozdziału 1	125
11.2.	Bibliografia do rozdziału 4	125
11.3.	Bibliografia do rozdziału 5	125
11.4.	Bibliografia do rozdziału 6	125
11.5.	Bibliografia do rozdziału 7	130
11.6.	Bibliografia do rozdziału 8	130
11.7.	Bibliografia do rozdziału 9	131
11.8.	Bibliografia do rozdziału 10	131
11.9.	Bibliografia uzupełniająca	131

TOM 2

Załączniki

1. Badania tensometryczne walcowej powłoki płaszczu zbiornika
2. Pomiar geometrii płaszczu zbiorników
3. Analiza statystyczna imperfekcji geometrycznych
4. Analiza zmienności rozkładu sił wewnętrznych, odkształceń oraz naprężeń dla powłok testowych
5. Wyniki obliczeń dla zbiorników rzeczywistych
6. Przykładowe, szczegółowe wyniki dla wybranego zbiornika

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 4
--	--	---------------------------

1. Wprowadzenie

Wymagania związane z zapewnieniem bezpieczeństwa energetycznego obowiązujące w wielu krajach wymuszają na przemyśle petrochemicznym podjęcia się realizacji baz zbiornikowych o coraz większych pojemnościach. W warunkach europejskich są to najczęściej stalowe zbiorniki walcowe o osi pionowej o pojemnościach 50.000, 75.000, 100.000, 125.000 metrów sześciennych. Znane są już światowe realizacje obiektów o pojemności nawet 320.000 i 350.000 metrów sześciennych [1-2]. Wymagania dla tak dużych zbiorników stawiają przed budowniczymi coraz większe wyzwania obliczeniowe i technologiczne. Zwiększenie pojemności zbiorników jest możliwe przy zastosowaniu stali o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych (np.: stali niskostopowych o znakach 15G2ANb; 18G2A; 18G2AV). Zbiorniki o dużej pojemności są bardziej efektywne ekonomicznie – dają zmniejszenie jednostkowego zużycia stali w przeliczeniu na metr sześcienny pojemności magazynowej obiektu [1-1]. Dotychczas w Polsce zrealizowane zostały zbiorniki o maksymalnej pojemności 50.000 m³. Najnowsze trendy w gospodarce magazynowej, szczególnie w zakresie magazynowania produktów naftowych, doprowadziły w ostatnim czasie do zrealizowania w Europie Środkowej obiektów o pojemnościach 75.000, 100.000 a nawet 125.000 m³ w wykonaniu ekologicznym, tzn. z zabezpieczeniami przed rozlaniem się magazynowanego produktu poprzez zastosowanie podwójnego stalowego dna oraz drugiego płaszcza osłonowego zastępującego dotychczas stosowane obwałowania ziemne [1-3]. Obiekty te wyposażane są w systemy monitorowania ostrzegające przed wyciekami produktu. Obiekty tego typu realizowane są już w polskich bazach magazynowych.

Budowa zbiorników o dużych pojemnościach stawia na pierwszym planie problemy wykonawcze związane z zapewnieniem odpowiedniego kształtu powłoki obiektu oraz określenie dopuszczalnych imperfekcji geometrycznych konstrukcji powłokowej, jakie można uznać za bezpieczne dla przyszłej, wieloletniej, eksploatacji obiektów.

Problem bezpieczeństwa eksploatowanych obiektów zbiornikowych ma szczególne znaczenie z uwagi na bezpieczeństwo ekologiczne i pożarowe, gdyż zbiorniki tego typu wykorzystywane w przemyśle petrochemicznym służą do magazynowania surowej ropy naftowej.

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

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 5
--	--	---------------------------

W rzeczywistej konstrukcji występują siły wewnętrzne, które na etapie analizy teoretycznej zostały pominięte ze względu na mały wpływ lub ze względu na same założenia przyjmowanych metod obliczeniowych. Walcowe zbiorniki stalowe projektuje się przy wykorzystaniu zasad dotyczących cienkich powłok uwzględniających, poza strefą zaburzeń brzegowych, błonowy charakter pracy płaszcza z zasadniczą przewagą sił obwodowego rozciągania. Pomija się przy tym wpływ pozostałych składowych jako nieistotnych, które w przypadku powłok z imperfekcjami nie są już pomijalnymi „małymi niższego rzędu”.

Problem oceny wartości niedoskonałości geometrycznych powłok płaszcza zbiornika, występuje przed przekazaniem zmontowanej konstrukcji zbiornika do użytkowania oraz podczas samej eksploatacji. W trakcie eksploatacji obiektu dochodzi do dalszych zmian rozkładu i wartości części imperfekcji płaszcza zbiornika. Uzależnione jest to od pracy danej powłoki, jej podatności, oraz od warunków gruntowych, które bezpośrednio wpływają na zmianę deformacji całej poboczniczy zbiornika. Jest to proces rozłożony w czasie zależny również do właściwości fizyko-mechanicznych gruntu oraz cech samego fundamentu, na którym został posadowiony zbiornik.

W trakcie eksploatacji zbiornika może dojść do powstania nowych, niejednokrotnie bardzo znacznych deformacji powłoki walcowej pod wpływem, np.: podciśnienia lub nadciśnienia eksploatacyjnego lub awaryjnego, nierównomiernego osiadania.

Imperfekcje płaszcza zbiornika o nadmiernej wartości są przyczyną zmiany rozkładu strumieni sił wewnętrznych, a tym samym naprężeń w powłoce. Stanowią one zagrożenie dla bezpiecznej eksploatacji 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 - płaszcza.

W rzeczywistych konstrukcjach inżynierskich nie można całkowicie wyeliminować imperfekcji geometrycznych. Deformacje są konsekwencją procesów technologicznych związanych z realizacją wszelkiego rodzaju obiektów inżynierskich, w tym analizowanych zbiorników.

Problem określenia dopuszczalnych wartości imperfekcji i ich bezpośredniego wpływu na stan naprężenia, w zasadniczym elemencie konstrukcyjnym – płaszczu zbiornika – staje się coraz bardziej interesujący w obliczu realizacji obiektów zbiornikowych dużych pojemności. Zagadnienia tu poruszane dotyczą również obiektów już istniejących, są szczególnie ważne w trakcie oceny ich przydatności do dalszej eksploatacji.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	Strona 6
--	--	--------------------

2. Cel pracy

Problem oszacowania wpływu istniejących deformacji płaszczy na stan bezpieczeństwa całego obiektu występuje często we współpracy Katedry Konstrukcji Metalowych Politechniki Gdańskiej z użytkownikami zbiorników magazynowych produktów naftowych. Imperfekcje płaszcza zbiornika powstałe w trakcie jego realizacji oraz w okresie użytkowania stwarzają niewątpliwie zagrożenia ekologiczne, ewentualnie znaczne utrudnienia eksploatacyjne, oraz mogą stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa pożarowego. Określenie dokładnego wpływu poszczególnych deformacji na stan wyężenia przekroju jest zagadnieniem trudnym do bezpośredniej oceny zarówno analizując pojedyncze deformacje jak i ich wzajemnej interferencji.

W związku z powyższym stawia się następującą tezę:

Eksploatowane powłoki walcowe z geometrycznymi imperfekcjami kształtu, stanowiące główny element konstrukcyjny zbiorników magazynowych, mogą stać się zagrożeniem dla bezpiecznej eksploatacji obiektów. Deformacje powłoki walcowej powodują zaburzenia rozkładu i wartości sił wewnętrznych a niejednokrotnie znaczny ich wzrost w pewnych obszarach. Konsekwencją dyslokacji sił wewnętrznych jest wzrost naprężeń w powłoce płaszcza zbiornika. Występujące imperfekcje, w trakcie przyrostu obciążenia ulegają niejednokrotnie zmianom charakteru – tzw. przeskoki powłoki, które są szczególnie niebezpieczne przy współistniejących wadach spawalniczych oraz znacznych uszkodzeniach korozyjnych elementów stalowych.

Rozpoznanie zagadnień przedstawionych w tezie niniejszej pracy ma duże znaczenie praktyczne i powinno pozwolić na określenie:

- rzeczywistego zakresu zmienności imperfekcji geometrycznych dla powłoki płaszcza zbiornika o określonej pojemności i budowie,
- wpływu wielkości i typu imperfekcji na zmienność sił wewnętrznych w powłoce,
- zakresu zmienności sił wewnętrznych i naprężeń w płaszczu zbiornika z imperfekcjami,
- zakresu zmienności przemieszczeń konstrukcji z imperfekcjami pod wpływem obciążenia próbnego.

Celem niniejszej pracy jest próba dokonania oszacowania wpływu niedoskonałości geometrycznej pobocznic, ich struktury i wielkości na stan wyężenia elementów składowych pod kątem określenia wielkości dopuszczalnych imperfekcji oraz poziomu bezpieczeństwa dla zbiorników magazynowych określonego typu.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 7
--	--	---------------------------

3. Zakres pracy

Niniejsza praca zostanie ograniczona do stalowych zbiorników walcowych, o osi pionowej, z dachami pływającymi z uwagi na zgromadzony, obszerny materiał porównawczy. Wszelkie analizy oparte będą na powykonawczych, geodezyjnych pomiarach geometrii płaszczy rzeczywistych obiektów zbiornikowych zrealizowanych w Polsce w latach dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku. Posiadany materiał pomiarowy dotyczy głównie zbiorników o pojemności 50.000 m³ (załącznik 2).

Dla tego typu i wielkości zbiornika podjęta będzie próba oszacowania wpływu zmienności naprężeń oraz określona wielkości dopuszczalnych odchyłek walcowej powłoki płaszcza zbiornika.

Przejęte schematy obliczeniowe oraz poprawności rozwiązań numerycznych zweryfikowane zostaną na podstawie terenowych badań tensometrycznych wykonanych na rzeczywistym, wycofanym z eksploatacji, zbiorniku tego samego typu, o pojemności 12.000 m³.

W ramach niniejszej pracy zostaną opracowane następujące zagadnienia:

- rozpoznanie zachodzących zmian odkształceń powłoki walcowej, w rzeczywistym obiekcie zbiornikowym na podstawie badań tensometrycznych,
- analiza statystyczna rzeczywistych odchyłek kształtu walcowych płaszczy zbiorników,
- analiza wpływu typowych, wyizolowanych i dokładnie zdefiniowanych, pojedynczych odchyłek geometrycznych na stan naprężeń w powłokach walcowych,
- analiza numeryczna wpływu niedoskonałości geometrycznych płaszcza na stan zmienności sił wewnętrznych i naprężeń w powłokach walcowych każdego z analizowanych rzeczywistych zbiorników,
- próba określenia wielkości dopuszczalnych odchyłek wykonawczych i eksploatacyjnych dla konstrukcji zbiornikowych, ze szczególnym uwzględnieniem zbiorników z dachami pływającymi .

W pracy niniejsze nie zostaną poruszone sprawy deformacji i uszkodzeń płaszczy zbiorników wywołanych w czasie eksploatacji powstałych pod wpływem podciśnienia lub też nadciśnienia. Uszkodzenia wywołane przez zmiany ciśnienia dotyczą zbiorników walcowych o osi pionowej, lecz wyposażonych w dachy stałe jak i zbiorników walcowych o osi poziomej. Zakres uszkodzeń i deformacji w trakcie awarii spowodowanej przyrostem ciśnieniem jest znacznie większy. Proces uszkodzeń przebiega często w bardzo krótkim czasie, podczas którego dochodzi do znacznych przemieszczeń i zniszczeń konstrukcji. Zniszczenia te związane są niejednokrotnie z trwałymi odkształceniami plastycznymi materiału.

4. Omówienie konstrukcji analizowanego w pracy zbiornika

Obiektem analiz statyczno - wytrzymałościowych niniejszej pracy jest konstrukcja stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej. Zbiornik wyposażony jest w dach pływający typu pontonowo-membranowego. Pojemność nominalna zbiornika wynosi 50.000 m^3 , a zasadnicze wymiary geometryczne przedstawiają się następująco:

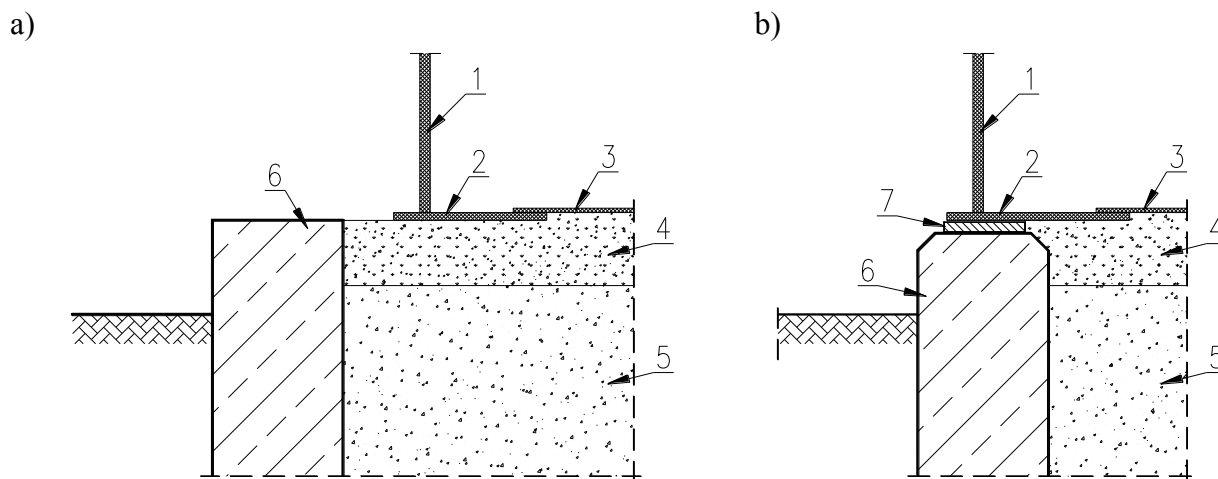
- średnica wewnętrzna płaszczu - 64,80 m,
- wysokość całkowita płaszczu - 18,10 m,

Zbiorniki tego typu eksploatowane są przede wszystkim przez przedsiębiorstwa związane z magazynowaniem i przeróbką ropy naftowej.

Badania terenowe wykonane techniką pomiarów tensometrycznych zostały przeprowadzone na rzeczywistej konstrukcji stalowego zbiornika o pojemności 12.000 m^3 . Szczegółowe omówienie konstrukcji oraz przebiegu badań przedstawiono w punkcie siódmym niniejszej pracy.

4.1. Konstrukcja fundamentu

W warunkach polskich spotyka się dwa sposoby posadowienia obiektów zbiornikowych. Widoczne różnice zostały przedstawione na poniższych rysunkach (rys. 4.1).



Rys. 4. 1. Sposoby fundamentowania

- a) posadowienie na poduszce piaskowej, b) posadowienie na poduszce piaskowej i pierścieniu żelbetowym,
1- płaszcz zbiornika, 2 – pierścień obrzeżny dna, 3 – wewnętrzna część dna stalowego, 4 – poduszka piaskowa nasączona olejem, 5 – fundament żwirowo – piaskowy, 6 – pierścień żelbetowy, 7 – elastyczna przekładka

Fundament zbiornika wykonywany jest na ogół z dwóch części charakteryzujących się odmiennymi parametrami. Środkowa część wykonana jest w postaci tzw. poduszki piaskowej, czyli odpowiednio zagęszczonej warstwy gruntu niespoistego, o stopniu zagęszczenia

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 9
--	--	---------------------------

$I_D=0,97\div 1,0$. Górna warstwa tego typu fundamentu, o grubości około 12 cm, wykonana jest z drobnego piasku zmieszanego z ciekłym bitumem (np.: asfalt, olej opałowy). Warstwa taka stanowi zabezpieczenie antykorozyjne dolnej powierzchni blach dna zbiornika, które nie są w żaden inny sposób zabezpieczone przed korozją. Górna powierzchnia fundamentu ukształtowana jest w formie stożka o pochyleniu około 1:120. Pochylenie skierowane na zewnątrz obiektu. Omawiany fundament piaskowy otoczony jest ciągłym, żelbetowym pierścieniem o szerokości około 40-50 cm. Pierścień żelbetowy w zależności od sposobu posadowienia może być zlokalizowany poza obrysem zbiornika (*rys. 4.1a*), albo bezpośrednio pod płaszczem zbiornika (*rys. 4.1b*). Wysokość omawianego pierścienia fundamentowego w przypadku analizowanych zbiorników dochodziła do 200 cm. Wysokość ta uzależniona jest od parametrów geotechnicznych gruntu w miejscu lokalizacji zbiornika.

Posadowienie zbiornika na fundamencie piaskowym, zgodnie z rysunkiem 4.1a na gruncie o różnej podatności ma bezpośredni wpływ na stan wyężenia przekroju w węźle „płaszcz – dno”. Problem ten został szczegółowo scharakteryzowany w pracach [4-1], [4-3].

W przypadku fundamentu przedstawionego na rysunku 4.1b, na styku poduszki piaskowej z żelbetowym pierścieniem w blachach stalowych dna zbiornika występuje zjawisko skokowej zmiany podatności podłoża, które wynoszą odpowiednio:

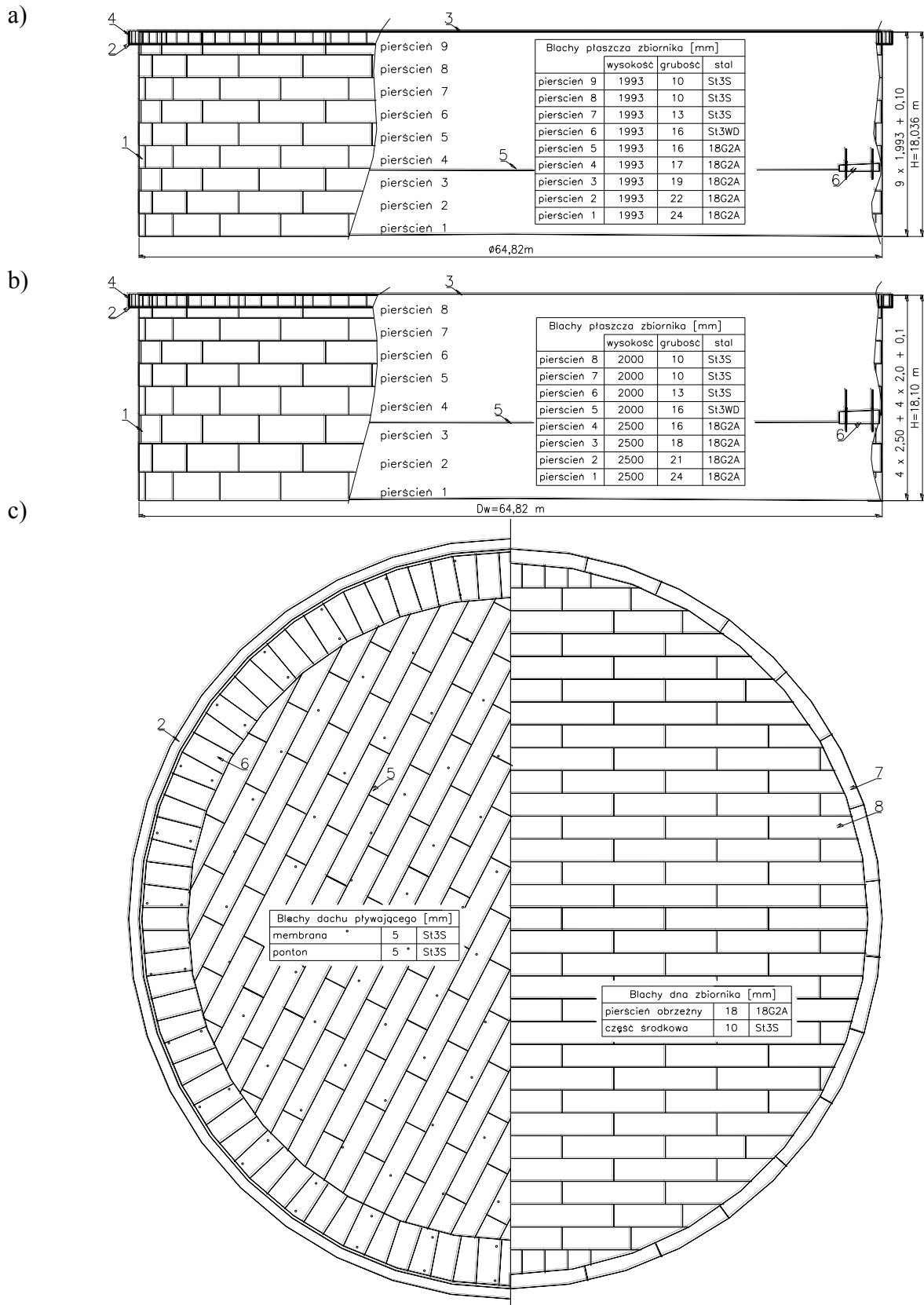
- 50 kN/m³ dla fundamentu piaskowego,
- 600 000 kN/m³ dla fundamentu żelbetowego.

Zjawisko to, podobnie jak już opisane wyżej, jest przyczyną zmiany stanu wyężenia w węźle połączenia blach płaszcza z blachami dna zbiornika.

4.2. Stalowa konstrukcja zbiornika

Zasadniczymi elementami konstrukcji zbiornika są stalowe dno oraz płaszcz. Dno zbiornika składa się na ogół z dwóch części: części środkowej i pierścienia obrzeżnego (*rys. 4.2*)

Część środkowa stalowego dna analizowanego zbiornika o pojemności 50.000 m³, wykonana jest z blach o grubości 8 mm. Blachy te ułożone są bezpośrednio na fundamencie piaskowym. Część środkowa stalowego dna zbiornika otoczona jest pierścieniem obrzeżnym, który wykonany jest z blach o grubości 16 mm. Pierścień ten spoczywa częściowo na fundamencie piaskowym - w swojej części wewnętrznej, zaś na obwodzie zewnętrznym, na żelbetowym pierścieniu fundamentowym.



Rys. 4. 2. Konstrukcja zbiornika $V=50\,000\text{ m}^3$

- a) płaszcz z 9 pierścieni poziomych, b) płaszcz z 8 pierścieni poziomych, c) dach pływający i dno
 1 – płaszcz zbiornika, 2 – stężenie wiatrowe (pomost komunikacyjny), 3 – kątownik wieńczący,
 4 – barierka ochronna na stężeniu wiatrowym, 5 – membrana dachu pływającego,
 6 – ponton dachu pływającego, 7 – pierścień obrzeżny dna, 8 – wewnętrzna część dna

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 11
--	--	----------------------------

Blachy dna łączone są w stykach poprzecznych spoinami czołowymi z zastosowaniem podkładek, zaś styki podłużne wykonane są na zakład z zastosowaniem spoin pachwinowych. Część środkowa dna zbiornika z pierścieniem łączona jest na zakład spoiną pachwinową. Dno zbiornika wykonywane jest z dwóch gatunków stali: część środkowa ze stali niestopowej znaku St3SY, część zewnętrzna ze stali niskostopowej o znaku 18G2A. Zasadniczy element konstrukcji zbiornika - płaszcz - wykonany jest z pierścieni - potocznie zwanych „cargami” - stalowych, na które wykorzystane zostały następujące gatunki stali:

- niskostopowej stali o znaku 18G2A należące do kategorii wytrzymałościowej E355 –
– dolne cztery pierścienie płaszcza
- niestopowej stali o znaku St3S – kategoria wytrzymałościowa E235 – wyższe pierścienie płaszcza.

Płaszcz składa się z ośmiu lub dziewięciu pierścieni (carg) o skokowo zmiennej grubości dostosowanej do liniowego rozkładu obciążenia. Ilość pierścieni uzależniona jest od przyjętej szerokości stosowanych arkuszy blach, która to jest ograniczona: możliwościami technologicznymi przemysłu hutniczego, założeniami projektowymi oraz techniczno-organizacyjnymi robót montażowych. Długość zastosowanych blach również musi być dostosowana do możliwości produkcyjnych. Grubości blach poszczególnych pierścieni przedstawiono na rysunkach nr 4.2a i 4.2b.

Blachy tworzące płaszcz zbiornika łączone są między sobą spoinami czołowymi zarówno w stykach pionowych jak i poziomych. Połączenie pomiędzy płaszczem a dnem wykonane jest z zastosowaniem obustronnej spoiny pachwinowej.

Płaszcz zbiornika zwieńczony jest w górnej części kątownikiem o wymiarach 100x100x10 mm, którego celem jest usztywnienie swobodnej jego krawędzi.

Ważnym elementem omawianego typu zbiornika jest stężenie wiatrowe, którego zadaniem jest zapewnienie stateczności powłoki walcowej przy działaniu obciążenia wiatrem. Jest ono szczególnie istotne w momencie, gdy dach pływający zbiornika znajduje się w najniższym możliwym położeniu, czyli przy pustym zbiorniku. Stężenie wiatrowe montowane jest na ostatnim pierścieniu płaszcza zbiornika w odległości 1100 mm od górnej krawędzi płaszcza. Wykonuje się je najczęściej jako spawane z blach. Stężenie to wykorzystywane jest przez obsługę jako pomost komunikacyjny.

Poza zasadniczymi elementami konstrukcji nośnej omawianego obiektu występują również inne elementy, które związane są z wyposażeniem technologicznym i oprzyrządowaniem. W ramach tego wyposażenia można wymienić:

- włazy - wejściowe, wyczystkowe, wentylacyjne,

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 12
--	--	----------------------------

- króćce - produktowe, pomiarowe,
 oraz elementy zapewniające odpowiednie ciągi komunikacyjne – schody, drabiny, pomosty.

Należy tu też wspomnieć o stalowej konstrukcja dachu pływającego, która sama w sobie stanowi odrębne zagadnienie inżynierskie.

4.3. Metoda montażu

Zbiorniki z dachami pływającymi montowane są najczęściej metodą nadbudowy, zwanej również metodą arkuszową. Metoda ta polega na dokonaniu scalenia pojedynczych arkuszy blach tworzących płaszcz zbiornika bezpośrednio na placu budowy. Stosowane są też inne metody np.: metoda rulonowa, metoda podbudowy z jej dwiema odmianami – poprzez podnoszenie pionowe lub podnoszenie po linii śrubowej, jednak są to metody rzadko wykorzystywane do budowy dużych zbiorników [4-2].

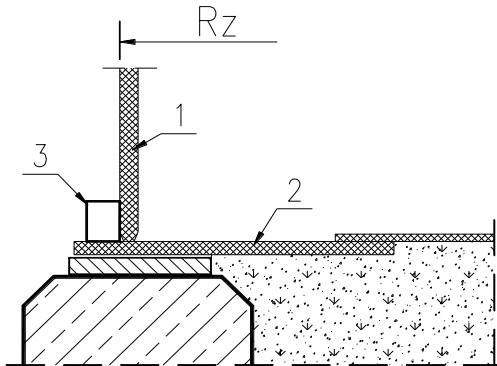
W metodzie arkuszowej scalenia konstrukcji dokonuje się na przygotowanym i odebranym przez nadzór fundamencie - szczególnie ważne są pomiary niwelety górnej powierzchni żelbetowego pierścienia fundamentowego oraz stopnia zagęszczenia poduszki piaskowej. Rola tych dwóch parametrów zostanie przedstawiona w dalszej części pracy.

Stalowe dno zbiornika wykonywane jest z blach ułożonych bezpośrednio na fundamencie piaskowym. W pierwszej kolejności układa się pierścień obrzeżny dna. Następnie układa się blachy tworzące wewnętrzną część zaczynając od pasa środkowego. Pas ten służy początkowo jako „droga”, po której transportuje się blachy sąsiednich pasów. W czasie układania blachy łączy się między sobą tylko spoinami szepnymi. Spawania blach środkowej części dna zbiornika dokonuje się po wstępnym scaleniu wszystkich elementów. Środkową część dna zbiornika łączy się z pierścieniem obwodowym dopiero po wykonaniu połączenia spawanego płaszcz z dnem. Taka kolejność zapewnia, że na środkową część dna nie przekazują się naprężenia wywołane skurczem następujących spoin:

- pionowych, łączących poszczególne arkusze blach w najniższym pierścieniu płaszcz,
- poprzecznych, łączących segmenty pierścienia obwodowego dna,
- obwodowej, łączącej płaszcz z pierścieniem obrzeżnym.

Blachy tworzące płaszcz dostarczane są na plac budowy jako wygięte, zgodnie z założonym promieniem krzywizny obowiązującym dla całej poboczniczy zbiornika. Blachy pierwszego pierścienia ustawiane są na pierścieniu obrzeżnym dna. Krzywizna poboczniczy zbiornika dla pierwszego pierścienia płaszcz zbiornika określona jest na montażu przez ograniczniki spawane do dna (*rys. 4.3*). Na czas montażu poszczególne arkusze blach łączone są

tymczasowo różnego rodzaju zworami (rys. 4.4), usztywnieniami (rys. 4.5), zastrzałami (rys. 4.6), które umożliwiają nie tylko szybkie połączenie blach, ale ułatwiają również łatwą regulację.



Rys. 4. 3. Ograniczniki dla pierwszego pierścienia płaszcza spawane do dna

1- płaszcz zbiornika, 2 – pierścień obrzeżny,
3 – ogranicznik montażowy



Rys. 4. 4. Zwora montażowa



Rys. 4. 5. Usztywnienia montażowe



Rys. 4. 6. Zastrzały dla pierwszego pierścienia

Po sprawdzeniu prawidłowości kształtu wykonuje się spoiny szcpe. Począwszy od drugiego pierścienia płaszcza do usztywnienia montowanej powłoki wykorzystuje się montażowe pierścienie profilujące, które zabezpieczają również przed utratą stateczności przy działaniu wiatru (rys. 4.7). Kolejne pierścienie płaszcza ustawiane są po dokonaniu korekty kształtu górnej krawędzi pierścienia niżej położonego. Styki spawane pomiędzy arkuszami blach tworzącymi poszczególne pierścienie jak i pierścienie pomiędzy sobą wykonywane są jako czołowe. Blachy zestawia się w taki sposób, aby uzyskać równą wewnętrzną powierzchnię pobocznicy zbiornika. Spawanie wykonywane jest ręcznie lub z wykorzystaniem różnego rodzaju automatów spawalniczych (rys. 4.8) (np. Vertomatic dla styków pionowych, Circomatic lub Bugo – tylko dla styków poziomych). Przykłady ukształtowania brzegów blach do spawania przedstawiono na rysunku (rys. 4.9). W celu ograniczenia wpływu skurczu spawalniczego oraz

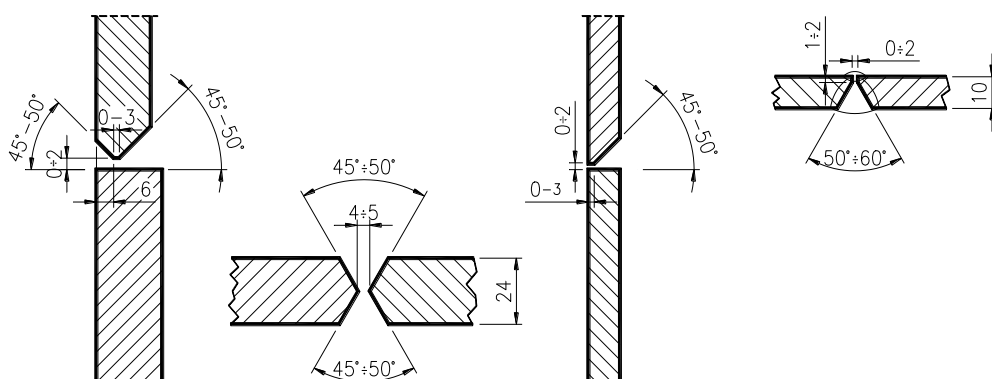
innych niedokładności wymiarowych poszczególnych arkuszy stosuje się blachy zamykające z naddatkiem. Arkusze zamykające dostarczane są z naddatkiem 300 - 500 mm, a ich dopasowanie wykonuje się bezpośrednio na montażu. Górną krawędź płaszczu zwieńcza się kątownikiem, zaś na ostatnim pierścieniu montuje się stężenie wiatrowe.



Rys. 4. 7. Pierścień profilujący



Rys. 4. 8. Automat spawalniczy



Rys. 4. 9. Przykłady ukosowania blach o różnej grubości



Rys. 4. 10. Prefabrykat ostatniego pierścienia płaszczu

Czasami dokonywane są próby wprowadzenia częściowej prefabrykacji polegającej na montażu arkuszy ostatniego pierścienia płaszczu z fragmentem stężenia wiatrowego (rys. 4.10).

Do montażu zbiornika oprócz osprzętu usztywniającego stosuje się różnego rodzaju rusztowania montażowe stałe i przejezdne oraz sprzęt dźwigowy (rys. 4.11).

a)



b)



Rys. 4. 11. Osprzęt montażowy

a) rusztowanie przejazdne, b) montaż z wykorzystaniem żurawia samobieźnego

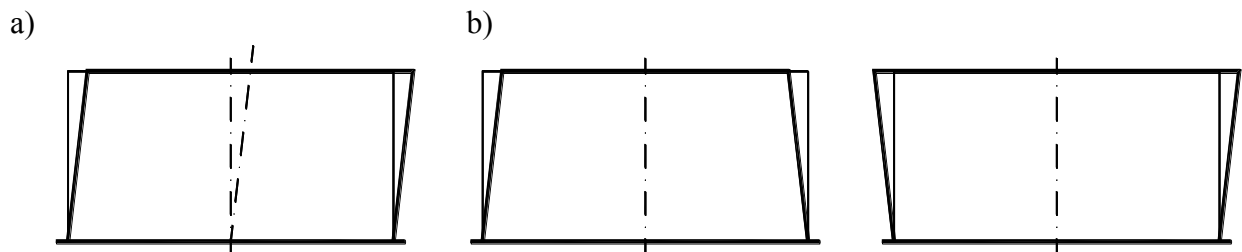
5. Imperfekcje geometryczne powłok walcowych

5.1. Rodzaje imperfekcji

Imperfekcje występujące na analizowanych powłokach płaszczu zbiorników walcowych można podzielić na następujące grupy:

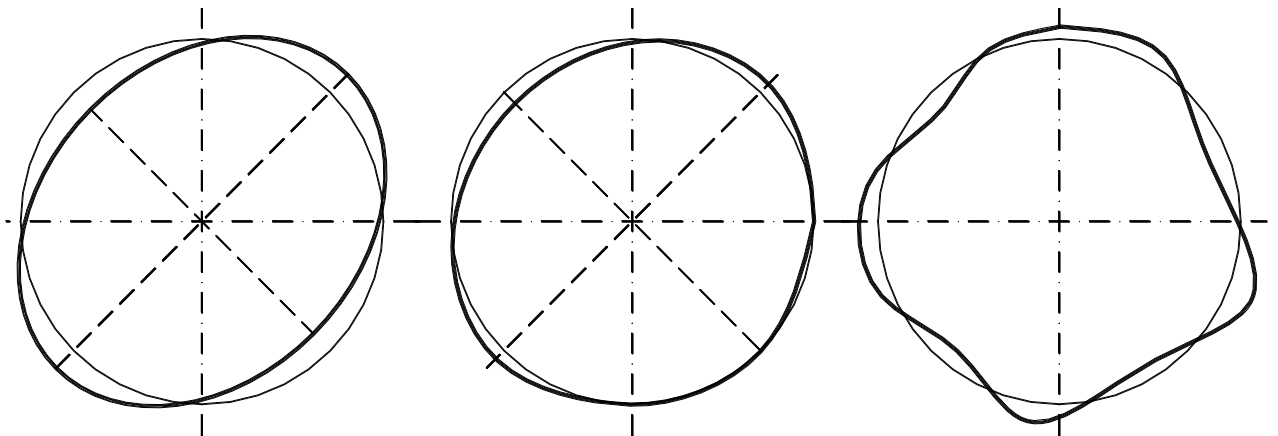
- 1) przechylenie walcowego płaszczu zbiornika,
- 2) stożkowy przebieg powierzchni pobocznicy,
- 3) owalizacja przekroju na poszczególnych poziomach,
- 4) deformacje kątowe spawanych styków pionowych pomiędzy blachami tworzącymi poszczególne pierścienie,
- 5) deformacje kątowe spawanych styków poziomych – spoina obwodowa łącząca poszczególne pierścienie płaszczu,
- 6) falisty przebieg walcowej pobocznicy tworzącej płaszcz,
- 7) lokalne odchylenia układu blach od tworzącej,
- 8) lokalne wgłębienie lub wypukłości na poszczególnych pasach i pomiędzy nimi.

Powyżej wymienione grupy imperfekcji można przedstawić w następującej formie graficznej (rys. 5.1–5.6).

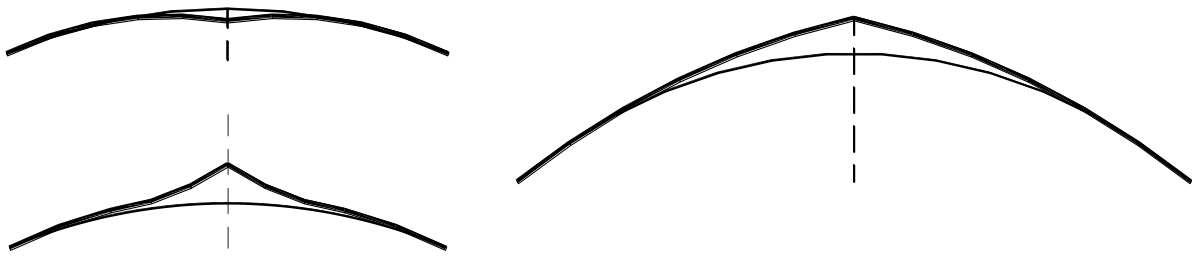


Rys. 5. 1. Odształcenia ogólne formy zbiornika

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



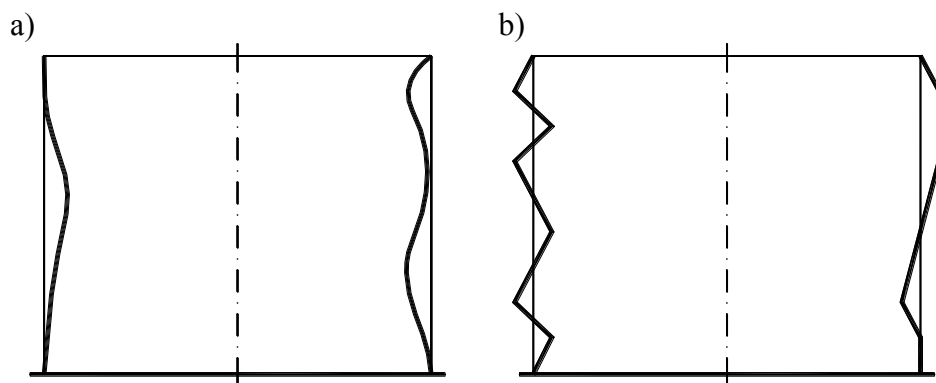
Rys. 5. 2. Owalizacja przekroju na poszczególnych poziomach



Rys. 5. 3. Deformacje kątowe spawanych styków pionowych blach tworzących pierścienie

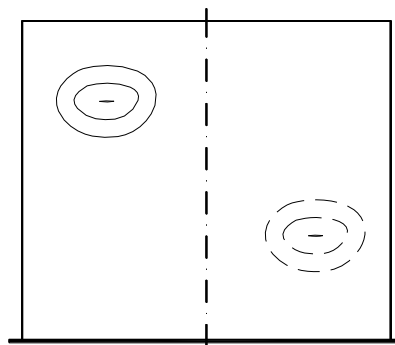


Rys. 5. 4. Deformacje kątowe spawanych styków poziomych



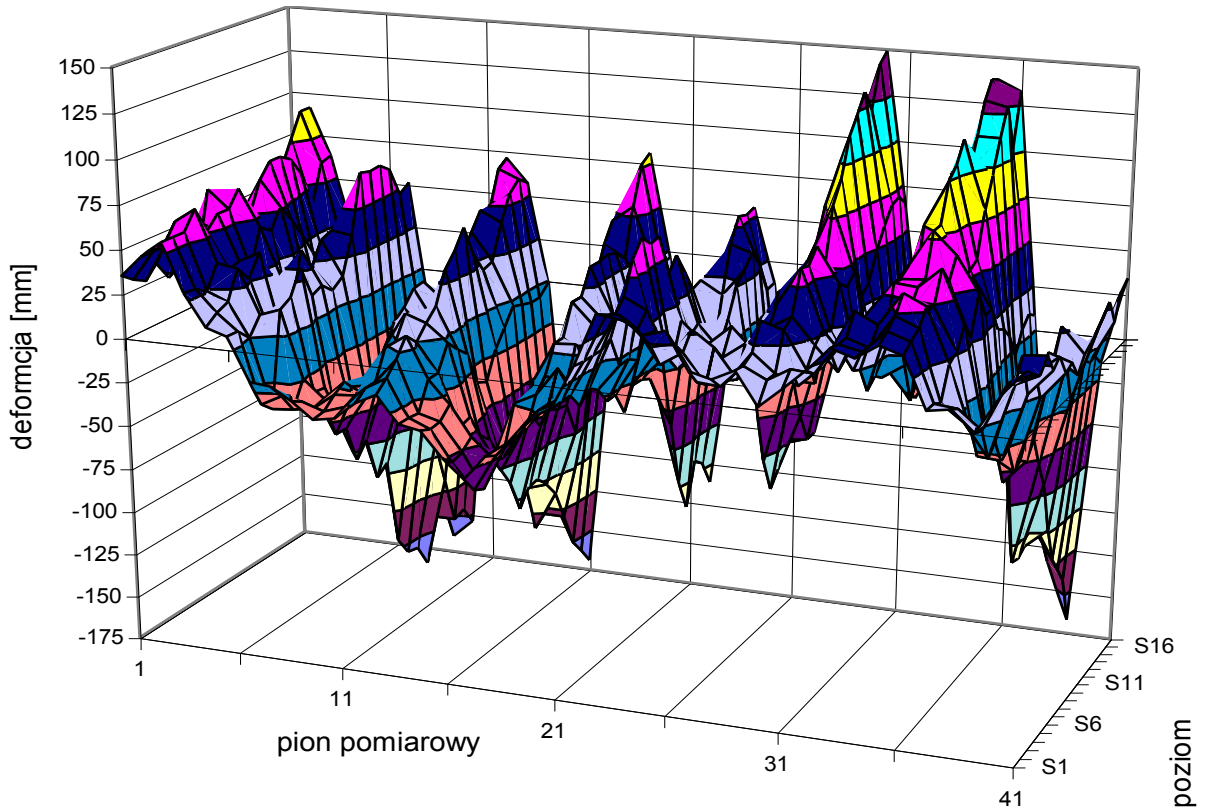
Rys. 5. 5. Imperfekcje tworzącej

a) falisty przebieg pobocznicy tworzącej płaszcz, b) lokalne odchylenia układu blach od tworzącej



Rys. 5. 6. Lokalne wgłębienie lub wypukłości

Wynikiem nałożenia się w/w imperfekcji jest ostateczny kształt płaszcza zbiornika, który przedstawiać może się bardzo różnie (rys. 5.7). Przyczyny i mechanizmy powstawania przedstawionych nieprawidłowości są bardzo złożone i zależą od szeregu czynników związanych z procesem wytwarzania i montażu zbiornika.



Rys. 5. 7. Przykładowa mapa deformacji płaszcza zbiornika



Rys. 5. 8. Przykłady deformacji

Imperfekcje geometryczne powłoki płaszczu zbiornika powstają w dwóch okresach:

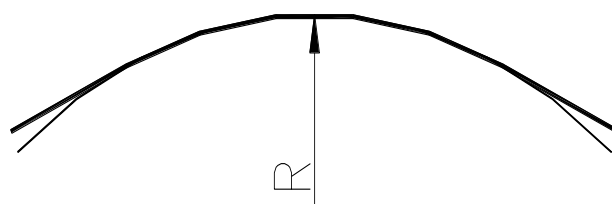
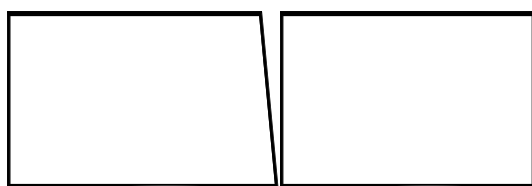
- 1) w okresie przygotowania elementów składowych potrzebnych do budowy zbiornika i wykonawstwo robót montażowych, co można łącznie określić mianem – okresu budowy,
- 2) w okresie eksploatacji zbiornika i niejednokrotnie pojawiający się w jego trakcie, a rozłożony w czasie, proces nierównomiernego osiadania konstrukcji fundamentu zbiornika.

5.2. Imperfekcje powstałe w okresie budowy zbiornika

Podstawowymi przyczynami wstępnych imperfekcji kształtu na etapie realizacji obiektu są:

- 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.

Znaczny wpływ na jakość geometrii zbiornika ma przestrzeganie właściwych tolerancji wymiarowych poszczególnych elementów składowych, szczególnie chodzi tu o długość, równoległość krawędzi oraz odpowiednie przygotowanie brzegów blach do spawania. Nierównoległość krawędzi scalanych blach przyczynia się w znacznym stopniu do powstawania różnych zaburzeń właściwej krzywizny (*rys. 5.9*). Kolejnym ważnym elementem jest nadanie poszczególnym arkuszom odpowiedniej krzywizny, która powinna być jednolita na całej długości arkusza (*rys. 5.10*). Często zdarza się, iż blachy mają np. niedowalcowane końcówki. Wada ta jest powodem występowania załamań kątowych na spawanych stykach pionowych. Zmiana krzywizny blach płaszczu może nastąpić również w trakcie niedbałego transportu oraz operacji załadunku i rozładunku. Montaż arkuszy o nieprawidłowej krzywiznie powoduje znaczne deformacje powłoki już na etapie scalania konstrukcji.



Rys. 5. 9. Nierównoległość krawędzi blach *Rys. 5. 10. Niedowalcowanie końcówek arkuszy blach*

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 20
--	--	----------------------------

Do nieprawidłowości w przygotowaniu konstrukcji zbiornika do montażu można zaliczyć:

- odchyłki w wypoziomowaniu obwodowego, stalowego pierścienia dna zbiornika,
- niewłaściwe wytrasowanie dolnej krawędzi poboczniczy na dnie zbiornika,
- nieprawidłowe ustawienie pojedynczych arkuszy blach,
- brak odpowiedniej kalibracji kołowości przekroju poszczególnych pierścieni ,
- ustawienie kolejnych pierścieni tworzących płaszcz zbiornika na nieprawidłowej bazie jaką jest poprzedni pierścień,
- brak wypoziomowania górnej krawędzi poszczególnych pierścieni,
- dociąganie lub docinanie blach,
- niedokładne zestawienie krawędzi blach do spawania,
- zastosowanie zbyt dużej liczby spoin szepnych i elementów montażowych (klamry, zaciski),
- brak zapewnienia możliwości swobodnych odkształceń blach w trakcie wykonywania prac spawalniczych.

Same prace spawalnicze wykonywane w celu ostatecznego scalenia elementów składowych są niejednokrotnie przyczyną powstawania kolejnych imperfekcji. Imperfekcje te spowodowane są takimi przyczynami jak:

- brak symetryczności układu spoin (zaprojektowanie i wykonanie spoin niesymetrycznych),
- nieprzestrzeganie technologii prac spawalniczych,
- wykonanie napraw spoin w późniejszym okresie, np.: usuwanie wadliwie wykonanych fragmentów spoin i układanie nowych w warunkach ograniczonego skurczu,
- występowanie wad spawalniczych takich jak nadmierny nadlew lub podtopienia spoin,
- brak przetopu grani spoiny.

Należy wziąć również pod uwagę fakt, iż konstrukcje zbiornikowe w trakcie prac montażowych narażone są na czynniki środowiskowe takie jak:

- przemieszczenie nie scalonych arkuszy pod wpływem działania wiatru,
- owalizacja kształtu płaszcza zbiornika pod działaniem porywów wiatru,
- nierównomierne nagrzanie poboczniczy płaszcza w trakcie operacji słońca,
- nierównomierne stygnięcie styków spawanych,
- różnice temperatur pomiędzy porami dnia oraz porami roku.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 21
--	--	----------------------------

5.3. Imperfekcje powstałe w fazie eksploatacji

Okres eksploatacji zbiornika to również czas zmian wielkości oraz charakteru imperfekcji powłoki walcowej. Zmiany te uzależnione są od:

- sposobu osiadania obiektu,
- oddziaływania przyłączy rurociągowych na powłokę walcową zbiornika [5-1],
- postępu korozji powodującej w konsekwencji zmianę redystrybucji sił wewnętrznych,
- prace remontowe i modernizacyjne z wykorzystaniem technik spawalniczych.

Procesy związane z nierównomiernym osiadaniem zbiorników zostały scharakteryzowane w pracach np. Jewstafiewa [5-2]. Osiadanie zbiorników jest procesem rozłożonym, w bliżej nie określonym, czasie oraz przede wszystkim procesem niepowtarzalnym. Osiadanie nierównomierne zbiornika jest przyczyną generalnej zmiany kształtu poboczniczy zbiornika, która niejednokrotnie może przyczynić się do utraty stateczności konstrukcji, a także stać się przyczyną ograniczeń eksploatacyjnych zbiornika – np. klinowanie się dachu pływającego, przeskoki powłoki stalowej, ewentualne pęknięcia.

Na zróżnicowanie osiadania fundamentu zbiornika wpływ mają następujące zjawiska:

- niejednorodność właściwości fizyko-mechanicznych podłoża gruntowego,
- niewłaściwe zagęszczenie podłoża w trakcie budowy,
- nieprzestrzeganie zasad koniecznej konsolidacji podłoża,
- lokalne uplastycznienie gruntu pod fundamentem na skutek wysokiego poziomu wód gruntowych, okresowego znacznego zawilgocenia w wyniku na przykład awaryjnej nieszczelności stalowego dna,
- nierównomierne obciążenie fundamentu – obciążenie skupione ciężarem własnym płaszczka na obwodzie i równomiernie rozłożone obciążenie środkowej części dna ciężarem słupa cieczy magazynowanej w zbiorniku,
- zmienny stopień zagęszczenia poduszki piaskowej na obwodzie i środkowej części zależny od oddziaływań atmosferycznych – zmian temperatury – szczególnie zamarzanie i odmarzanie części gruntu znajdującego się w bezpośrednim sąsiedztwie pierścienia okalającego.

Do zasadniczych objawów wpływu nierównomiernego osiadania, poza zmianą poziomu fundamentu, można zaliczyć:

- przechylenie zbiornika,
- obwodowe odkształcenia,
- zniekształcenia wzdłuż średnicy.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 22
--	--	----------------------------

Zasięg odkształceń nie ma charakteru zaburzenia lokalnego, lecz obejmuje całą powierzchnię pobocznicy. W zagadnieniach tych nie ma możliwości wyodrębnienia błonowego stanu wyjściowego. Poszukiwany stan naprężeń jest wymuszony przemieszczeniami, a stan zgięciowy narasta wraz ze wzrostem przemieszczeń spowodowanych nierównomiernym osiadaniem.

Końcowa wartość imperfekcji geometrycznych płaszcza zbiornika jest sumą wszystkich wpływów występujących na poszczególnych etapach budowy jak i eksploatacji. Miejsce ich występowania, wartość i zasięg, łatwe do zlokalizowania w poszczególnych przypadkach w swoim ostatecznym kształcie są wielkościami przypadkowymi, rozłożonymi w sposób losowy na powierzchni powłoki.

Możliwość oceny wpływu poszczególnych czynników na ostateczną wartość i charakter powstających imperfekcji i wywołane przez nie zmiany rozkładu sił i naprężeń w powłoce zbiornika jest niemożliwy w układzie rzeczywistych konstrukcji. Dlatego też w niniejszej pracy pomierzone rzeczywiste odchyłki geometrii płaszczy zbiorników będą traktowane całościowo jako nieprawidłowość kształtu o charakterze losowym. W kolejnej części przedstawione będą wyniki obliczeń wykonane dla wyizolowanych, najczęściej występujących imperfekcji geometrycznych w celu oszacowania konkretnie ich wpływu na stan zaburzenia sił wewnętrznych w powłoce rozpatrywanego zbiornika.

6. Przegląd literatury

Tematyka niniejszej dysertacji choć ograniczona została na wstępie do analizy zachowania się płaszczu 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 zagadnienia 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 interferencją oddziaływań mają wpływa na stan bezpieczeństwa obiektu. Z tego powodu w niniejszym rozdziale oprócz przedstawienia literatury dotyczącej wyłącznie analiz imperfekcji geometrycznych przedstawiona będzie literatura na temat innych czynników i analiz obejmujących swym zakresem zmienny stan naprężeń w płaszczu zbiornika. Dla pewnej systematyki tego rozdziału cytowana literatura zostanie przedstawiona w postaci kilku oddzielnych bloków tematycznych.

6.1. Podstawy projektowania zbiorników

Konstrukcja zbiornika stalowego, walcowego o osi pionowej z dachem pływającym w polskich warunkach rozwoju technicznego jest stosunkowo młodą konstrukcją. Pierwszą prototypową konstrukcją zbiornika wybudowano w końcu lat pięćdziesiątych XX wieku w Blachowni Śląskiej [6-115]. Rozwój gospodarczy oraz zapotrzebowanie na pojemność magazynową doprowadziły do szybkiego rozwoju tego typu konstrukcji. Już w 1974 roku budowane były obiekty o pojemności 50 000 m³ [6-96].

Postawą wykonywania zbiorników są aktualne w danych okresach czasu normy przedmiotowe, pozycje literaturowe oraz tak zwane dobre wzorce, które zostały wypracowane i sprawdzone przez lata [6-39]. W ramach przepisów normalizacyjnych stosowane są jako podstawowe normy krajowe [6-69], [6-70], [6-71] jak i innych państw, a w szczególności w zakresach, które są nieuregulowane w ramach naszych przepisów. Wśród norm tych warto wymienić normy niemieckie [6-12], [6-13] oraz normę angielską [6-9]. Na oddzielne

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 35
--	--	----------------------------

wymienienie zasługują przepisy opracowane przez Amerykański Instytut Petrochemicznych [6-3], które uchodzić mogą za rodzaj podręcznika konstruowania obiektów zbiornikowych.

Z zagadnieniami normalizacji związane są nieodłącznie problemy zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji – prace Mendry [6-55], Murzewskiego [6-62], [6-63] oraz uzasadnionych rozwiązań ekonomicznych [6-45].

Pełne kompendium wiedzy na temat projektowania, wykonywania konstrukcji prezentowane są przez takich autorów jak Lessig [6-48] i Ziółko [6-114].

W celu uproszczenia metod wykonywania obliczeń dla konstrukcji zbiornikowych, wykonywanych tradycyjnymi metodami, opracowywane były nomogramy do obliczania sił wewnętrznych w walcowych powłokach [6-50] i tabele dla obliczeń sił w połączeniu płaszcza z dnem [6-68].

6.1.1. Metody obliczeń dla powłok walcowych idealnych

Metody obliczeń sił wewnętrznych w różnego rodzaju konstrukcjach powłokowych stały się przedmiotem wielu opracowań naukowych pierwszej połowy XX wieku. Wielu autorów prac badawczy zajmowało się tego typu konstrukcjami z uwagi na ich duże zastosowanie w powszechnie stosowanej technice, jak również z uwagi na ogólnie proste układy równań służące do opisu matematycznego. Podstawowe równania technicznej teorii powłok walcowych podali tacy autorzy jak: W. Z. Własow [6-90], L. Morley czy też Sanders. Niejednokrotnie podane przez wspomnianych autorów równania były przedmiotem dyskusji w pracach innych autorów. Jednak podstawowym źródłem informacji o tego typu konstrukcjach są pozycje literaturowe takich autorów jak: Girkmann [6-19], Lundgren [6-49], Menyhard [6-58], Flügge [6-18]. Nie bez znaczenia są także w tej dziedzinie polskie nazwiska Mazurkiewicz [6-51], [6-52], Nowacki [6-64], czy też niedawne publikacje Wojewódzkiego [6-91]. Autorom przytoczonych powyżej pozycji literaturowych możemy zawdzięczać pełen przekrój analitycznych metod obliczania konstrukcji powłokowej, a w tym ich szczególnego przypadku tj. konstrukcji zbiorników walcowych o osi pionowej. Już najstarsze cytowane tu opracowania [6-19] podają metody obliczania zbiorników o różnej konstrukcji. Warto tu choćby wskazać na przyjętą już wtedy systematykę wg której klasyfikowano tego typu obiekty. Wyróżniano wówczas modele obliczeniowe walcowej powłoki zbiorników: o stałej grubości ścianki, o zmieniającej się schodkowo grubości ścianki oraz grubości zmiennej liniowo. Uwzględniano przy tym sposób połączenia płaszcza u podstawy z podziałem na: zbiornik z płaszczem całkowicie utwierdzonym i zbiornik z dnem płaskim spoczywającym na podłożu.

W przedstawianych rozwiązaniach równań różniczkowych uwzględnia się zarówno efekty występujące w stanie błonowym w konstrukcji jak i problem zaburzeń brzegowych i zaburzeń występujących pomiędzy pierścieniami płaszcza o różnej grubości wg rozwiązania opracowanego przez C. Runge w 1904 roku [6-75]. Podane rozwiązania dotyczyły nie tylko zbiorników wypełnionych cieczą, ale również obliczeń konstrukcji pod wpływem obciążenia wiatrem. Kolejne podziały na modele obliczeniowe wprowadził w swojej książce Menyhard [6-58] uzupełniając wcześniej podane o zbiornik o dolnym brzegu częściowo utwierdzonym, w którym to przypadku dochodzi do obrotu i przemieszczania się węzła płaszcz - dno oraz przypadku zbiornika z płytą denna podpartą swobodnie, np. na pierścieniu podporowym. Inni cytowani tu autorzy podchodzili do rozwiązania problemu albo w ten sam sposób lub przy wykorzystaniu innych metod. W publikacji Wojewódzkiego [6-91] można znaleźć metody określania nośności granicznej dla powłok walcowych obciążonych hydrostatycznie. Zastosowany tu został podział ze względu na wysokość obiektu: na zbiornik niskie, średnie i wysokie.

6.1.2. Stateczność powłoki walcowej

Powyżej wymienione publikacje przedstawiają metody obliczeń podstawowych wielkości statycznych dla powłok walcowych – siły błonowe oraz efekty brzegowe określone dla powłok o idealnej geometrii. Jednak określenie problemów stateczności nie jest już tak proste. Wartości obciążenia krytycznego dla obliczeniowych modeli powłok są kilkakrotnie wyższe od wartości uzyskiwanych w trakcie eksperymentów (realizowanych przez m.in. Wolmir [6-94], Grigoluk, Kabanow, Harris, Arbocz, Waszczyszyn). Tak więc w tym przypadku wyniki doświadczeń służą nie tylko do weryfikacji przedstawianych teorii ale i dla oceny stateczności powłok realnych stosowanych w praktyce. Pierwsze formuły określenia naprężeń krytycznych dla idealnej powłoki walcowej w zakresie sprężystym zostało podane przez Timoshenko [6-84]

$$\sigma_{kr}^{perfekt} = \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1-\nu)^2}} \cdot \frac{t}{r} \quad [6.1]$$

Co dla powłok stalowych o dużej smukłości $\lambda = r/t$ oraz współczynnika Poisson'a $\nu = 0,3$ daje wzór

$$\sigma_{kr}^{perfekt} = 0,605 \cdot \frac{E \cdot t}{r} \quad [6.2]$$

Określone na tej podstawie wartości nie znalazły potwierdzenia w eksperymentach przeprowadzanych przez innych badaczy. Znaczne zmniejszenie uzyskanych doświadczalnie

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 37
--	--	----------------------------

wartości krytycznych jest tłumaczone różnymi źródłami nieliniowości, a przede wszystkim imperfekcjami jakimi obarczone są powłoki realnych obiektów. Niemożność oszacowania wartości dopuszczalnych naprężeń krytycznych na drodze analitycznej wymusiła określanie jej na poziomie bezpiecznym poprzez wprowadzenia „współczynnika zmniejszającego” do wartości określonej dla idealnej powłoki. Są to jednak oszacowania ograniczone swym kresem dolnym i górnym oraz prawdziwe przy pewnego rodzaju ograniczeniach geometrycznych takich jak np. smukłość obiektu. W celu rozwiązania problemu stateczności powłok walcowych w zakresie sprężysto - plastycznym opracowano formuły interakcyjne uwzględniające istnienie imperfekcji zgodnie z normą TGL [6-82]. Wykorzystano w nich weibulłowski współczynnik zmienności, pełniący rolę parametru imperfekcji sprężysto - plastycznej. Parametrowi temu o zakresie zmienności od $u = 0,25 \div 1,0$ ze skokiem co 0,25 przyporządkowano wielkości wstępnych zakłębnień powłoki z zakresie $w_0 = 0,3t \div 2t$, gdzie t jest grubością powłoki. Przez takie przyporządkowanie wprowadzono cztery klasy imperfekcji oznaczone literami a, b, c i d odpowiadające odpowiednio małym, średnim, dużym i bardzo dużym imperfekcjom. Opracowane w ten sposób reguły określenia granicznej wytrzymałości uwzględniają technologię i dokładność wykonania powłoki [6-56]. Inne stosowane podejścia zostały zaprezentowane przez Menderę w pracach [6-53], [6-54], [6-57]. W latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku ukazywały się prace Donnell'a, Nash'a, Bołotina, które opisują badania stateczności powłok z uwzględnieniem wstępnych odchyłek. To prekursorskie prace Donnell'a w zakresie nieliniowej teorii powłok pozwoliły na otrzymanie wartości obciążeń krytycznych zgodnych z wynikami doświadczalnymi. Jednak te pierwotne badania i hipotezy oparte były na dogodnej do obliczeń postaciach odchyłek, nie biorących pod uwagę rzeczywistych niedokładności technologicznych. Zgodnie ze stwierdzeniem podanym przez Wilde [6-89] odchyłki geometryczne rzędu dziesięciu i więcej krotności grubości ścianki powłoki walcowej zmieniają znacznie geometrię powierzchni i występuje konieczność uwzględnienia rzeczywistego charakteru tych niedokładności. Zagadnieniu stateczności zbiorników stalowych na cieczy poświęcona jest praca Baczyńskiego i Janasa [6-4], w której opisano zasadnicze cechy pracy zbiorników analizując działające obciążenia oraz przeprowadzając określenie stateczności przy określonych typach obciążeń. W pracy tej odchyłki wstępne przyjmowane są jako deterministyczne, drugiego rzędu.

Nawet ostatnio wykorzystywane metody neuronowe znalazły zastosowanie do określenia nośności krytycznej dla powłok z imperfekcjami. [6-85].

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 38
--	--	----------------------------

6.2. Zagadnienia eksploatacyjne

Rozpoczynając analizę wielkości wpływających na stan wyężenia przekroju płaszczu pod wpływem czynników zewnętrznych należy wziąć pod uwagę oprócz podstawowego obciążenia magazynowana cieczą wewnątrz również takie czynniki jak obciążenia wiatrem i osiadanie, zagadnienia technologiczne spawania, doboru materiałów jak i późniejszej korozji stalowej konstrukcji.

6.2.1. Osiadanie zbiorników

Zagadnienia osiadania obiektu stanowi duże problemy eksploatacyjne ale również wpływa znacząco na stan wyężenia płaszczu oraz węzła „płaszcz – dno” czyli związane jest bezpośrednio z problemem zaburzeń brzegowych.

Problem ten analizowany był wielokrotnie przy różnych warunkach brzegowych przez takich autorów jak: Ziółko, Mikulski, Jewstafiew, Hailan, Schneider, Chróścielewski, Wizmur, Křrupka i wielu innych. Osiadanie zbiornika może mieć charakter lokalny – miejscowe deformacje na niewielkiej części obwodu jak również dotyczące całego obiektu. Analizą wpływu nierównomiernego osiadania w swoich pracach zajmował się między innymi Jewstafiew [6-33], [6-34], [6-35] i Ziółko [6-95]. W pracach tych stwierdzono korelacje pomiędzy osiadaniem zbiorników a zmianą stanu deformacji płaszczu, niejednokrotnie uniemożliwiające normalne i bezpieczne eksploataowanie obiektu. Stwierdzono wówczas, iż osiadania w formie osiadania połowy zbiornika oraz osiadanie bisymetryczne całego obiektu – osiadanie dwóch leżących naprzeciw siebie połówek nie wywołują istotnego wzrostu sił wewnętrznych lecz prowadzą do znacznej owalizacji przekroju. Natomiast osiadania lokalne, na niewielkim odcinku są powodem znacznego wzrostu sił wewnętrznych w rejonie dna oraz górnej krawędzi zbiornika oraz lokalnej deformacji płaszczu na całej wysokości. Określono wówczas charakterystyczne przekroje rozkładu naprężeń w stosunku do obranego kierunku osiadania. Analizowano również modele numeryczne rzeczywistych osiadań zbiorników o pojemności 32 i 50 tysięcy metrów sześciennych. W latach późniejszych podobne podejście wpływu osiadań miejscowych oraz harmonicznnych na stan naprężeń w płaszczu można przeanalizować w pracach Hornum i Saal [6-31], Jonaidi i Ansurian [6-36], Schneidera [6-77]. Podobną tematykę w swojej pracy podjął Hailan [6-29] analizując wpływ osiadania na stan naprężeń w płaszczu oraz dnie przy napełnionym jak i pustym zbiorniku.

W pracach tych przewija się problem określenia warunków odpowiedniego posadowienia obiektów – w całości na poduszce piaskowej czy też na podłożu o zmiennej sztywności. Problem

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 39
--	--	----------------------------

ten analizowany jest w wielu pracach, choćby wspomnieć tu prace Chróścielewskiego i Wizmura [6-10] przedstawiających problem zaburzeń brzegowych dla zbiorników cylindrycznych posadowionych w całości na sprężystym podłożu, czy też analizy Andermana i Kempnego [6-2], Kalisza [6-37]. Rozwój technik numerycznych pozwolił w późniejszych latach na znalezienie odpowiedzi na temat relacji pomiędzy sztywnością fundamentu piaskowego a zmiennością sił wewnętrznych. Analizy takie przestawił Ziółko w swojej publikacji [6-113]. Kolejnym krokiem analiz przeprowadzonych przez Ziółko wraz z Mikulskim [6-98], [6-99] była analiza zmienności sił wewnętrznych na fundamencie o skokowo zmiennej sztywności – fundamencie piaskowym otoczonym żelbetowym pierścieniem. Również zmiana sztywności węzła „płaszcz – dno” realizowana przez zmianę grubości blach składowych prowadzi do zmian sił wewnętrznych [6-112]. Przedstawione w tej publikacji analizy pozwalają na stwierdzenia, że oszacowania określone wg reguł podanych przez Girkmanna [6-19] można przyjmować jako górny kres obszaru zmienności wartości sił wewnętrznych przy uwzględnieniu różnych podatności. Wykresy zmienności momentu zginającego, podane przez autora zarówno dla płaszcza jak i dna zbiornika, pokazują wzrost wartości analizowanego momentu wraz ze wzrostem wartości współczynnika podatności „k” w zakresie od 50 do 200 [N/cm³]. Kontynuacją prac Ziółko nad analizą sił w połączeniu płaszcza z dnem są wyniki przedstawione przez Krupkę [6-47]. Holst i Rotter w swojej pracy [6-30] przedstawili wpływ efektu osiadania na nieliniową odpowiedź powłoki oraz jej wyboczenie. Techniczne aspekty stosowanych w polskich warunkach różnych rodzajów posadowienia zbiorników na paliwa płynne prezentował w swojej publikacji Gwizdała [6-28].

6.2.2. Wady spoin, zmęczenie, kruche pęknięcie, korozja

Nieuniknione współistnienie imperfekcji geometrycznych całej powłoki walcowej płaszcza oraz lokalnych załamań kątowych w rejonie połączeń spawanych stwarza kolejny problem wytrzymałościowy. Problemem tym jest niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa połączeń spawanych. Badania zmęczeniowe zdeformowanych złączy spawanych charakterystycznych dla płaszczy zbiorników stalowych prowadzone były w Instytucie Spawalnictwa im. E.O. Patona w Kijowie. W badaniach tych stwierdzono „istnienie krytycznej wartości deformacji kątowej po przekroczeniu której następuje wyraźne zmniejszenie wytrzymałości niskocyklowej z równoczesnym znacznym rozrzutem wyników” [6-7]. Problem ten przedstawiany jest również przez innych autorów np. pracach Wojnowskiego [6-92], [6-93].

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 40
--	--	----------------------------

Poziom bezpieczeństwa obiektu związany jest nie tylko z odpowiednim doborem materiału ale również z jakością połączeń spawanych oraz korozją elementów. Analizą wpływu wad spawalniczych oraz korozją przyspoinową na stan wytrzymałości zbiornika w swojej pracy zajmował się Kowalski [6-46], który stwierdził, iż wady spawalnicze mieszczące się w zakresie dopuszczalnych normowo wartości nie są przyczyną inicjacji pęknięć. Zwraca jednocześnie uwagę, że występowanie wspomnianych wad spawalniczych oraz imperfekcji kształtu płaszcza, będące przyczyną lokalnych koncentracji naprężeń mogą być bezpośrednią przyczyną pęknięć spoin pionowych.

Same połączenia spawane są powodem powstawania deformacji kątowych i dodatkowych naprężeń w płaszczu. Problem ten został przedstawiony także w publikacjach Hubnera, Tenga i Saala [6-32].

Kolejnym problemem jaki może wystąpić w konstrukcjach zbiornikowych, a częściowo wywołany przez imperfekcje geometryczne, prowadzące do koncentracji i zmiany rozkładu sił wewnętrznych, to kruche pękanie elementu stalowego. Problem ten został dobrze rozpoznany w połowie ubiegłego wieku, ale na nieszczęście będący przyczyną katastrofy zbiornika [6-105].

Wspomniana już wcześniej korozja jest niejednokrotnie dużym problemem eksploatacyjnym prowadzącym do znacznego osłabienia konstrukcji. Rozwój korozji w zbiornikach jest bardzo zróżnicowany i zależy od jakości stali, rodzaju magazynowanego produktu oraz określonej części konstrukcji zbiornika. W tym miejscu warto wspomnieć o publikacjach Morawskiego [6-59], [6-60], Ziółko [6-100], Biegusa i Hotały [6-6] analizujących nośność uszkodzonych korozyjnie zbiorników stalowych.

6.2.3. Imperfekcje płaszczy zbiorników

Na wielu konferencjach problemowych poświęconych konstrukcjom zbiornikowym pośród wielu problemów już omówionych wcześniej częstym tematem są imperfekcje kształtu pobocznic płaszczy zbiorników. Pewnego rodzaju podsumowanie i postulaty w tej sprawie były formułowane np. przez Morawskiego [6-61] i Grzebalskiego [6-27] na seminarium poświęconym jakości zbiorników naziemnych – które odbyło się w roku 1995 w Zakopanem. Pierwszy z autorów stwierdza iż „odkształcenia płaszcza, takie jak owalizacja, wyboczenia, miejsca płaskie i wklęsnięcia wzdłuż spoin ocenia się indywidualnie z uwzględnieniem warunków eksploatacji konstrukcji”. Drugi zaś na podstawie posiadanych informacji z realizacji obiektów stwierdza iż „obmiary i oględziny zbiorników a szczególnie owalność, pionowość wklęsnięcia i wypukłości płaszcza, układ blach w pierścieniach, połączenia pierścieni wykazały

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 41
--	--	----------------------------

niezgodności z projektem oraz przekroczenie tolerancji wymiarowych określonych PN-84/B-06210 [6-70]. Błędy te powstały w czasie montażu zbiorników, bez widocznych wpływów eksploatacyjnych, czy też klimatycznych”. Autor ten stwierdzał różnego rodzaju odkształcenia dna wewnętrznego oraz jego obrzeża. Wnioski które zostały postawione w referacie to:

- „- zniekształcenia płaszczy zbiorników powstają głównie podczas ich montażu,
- Imperfekcje geometryczne, szczególnie w płaszczu, mogą mieć niekorzystny wpływ na zachowanie się materiału pod działaniem obciążeń zmiennych niskocyklowych w czasie długotrwałej eksploatacji.
- Brak metod i technik postępowania w zakresie oceny niezawodności zbiorników z imperfekcjami. Dotyczy to zarówno podstaw teoretycznych jak i działań praktycznych”

Jakkolwiek stwierdzenia takie podano w połowie lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku na spotkaniach specjalistów z zakresu projektowania, budowy i eksploatacji obiektów zbiornikowych to problemy nie nowe i wielokrotnie już analizowane i prezentowane w literaturze przedmiotowej przez różnych autorów znacznie wcześniej. Pierwsze analizy miejscowych odkształceń tylko i wyłącznie płaszczy zbiorników magazynowych opublikowane zostały przez Ponomariewa w 1959 roku na łamach pisma „Inżynieria i Budownictwo” [6-73]. poprzedzone artykułem o formach odchyleń geometrycznych w zbiornikach walcowych [6-72]. W swym artykule autor analizuje wady wg następującej klasyfikacji:

- wypukłości o kształcie sferyczny i podłużnym,
- wypukłości o małej strzałce, tworzące rodzaj membrany,
- fałdy poziome.

jako najbardziej rozpowszechnione w konstrukcjach. Przedstawione rozwiązania oparte zostały na analizie podstawy powłok małowyniosłych. Wielkość odkształceń powłok dla zbiorników jest przedmiotem artykułu Błaszczaka [6-8], w którym zaprezentowano wyniki pomiarów dla czterech zbiorników z dachem stałym o pojemności 5000 m³ realizowane równolegle w jednym ze składów paliwowych. W artykule stwierdzono, że deformacje nie są zależne od wielkości obiektu, lecz od prawidłowo przyjętej technologii spawania i kwalifikacji firm realizujących obiekt.

Problem oceny wpływu niedokładności kształtu poboczniczy na wartości sił wewnętrznych jest tematem artykułu Kodreckiego i Pytel [6-43]. W publikacji tej dokonano następującej klasyfikacji odchylek geometrycznych:

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 42
--	--	----------------------------

- owalizacja poziomego poprzecznego przekroju zbiornika, przy zachowaniu prostoliniowości i pionowości jego tworzących,
- defekty tworzących zbiornika, przy zachowaniu kołowości poziomych przekrojów poprzecznych (defekt osiowo symetryczny).

Wg autorów pierwszy wymieniony typ prowadzi do zmiany stanu bezmomentowego płaszcza zbiornika. W wyniku owalizacji przekroju pojawiają się wszystkie trzy składowe wektora sił dla stanu błonowego, w przeciwieństwie do stanu kołowego, w którym wyróżniamy jeden wektor składowy N_ϕ . W przypadku drugiej formy istniejące defekty mogą prowadzić do przekształcenia powłoki walcowej w powłokę o ujemnej krzywiznie Gaussa, które prowadzą do znacznego udziału składowych stanu giętnego. Stwierdzono, iż efekt owalizacji powoduje powstanie naprężeń w górnej części płaszcza, prawie od początku napełniania zbiornika przez zmianę charakteru stanu bezmomentowego przez wprowadzenie sił stycznych. Autorzy znaleźli potwierdzenie otrzymanych analitycznie wartości w wynikach badań tensometrycznych przeprowadzonych w 1975 roku na zbiorniku o pojemności 32 000 m³ wykonanych przez Instytut Konstrukcji Budowlanych Wydziału Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej.

Kolejnym przykładem oszacowania nośności i stateczności płaszcza zbiornika z dachem pływającym przedstawił Rządkowski [6-76]. Dokonywał on oszacowania nośności płaszczy eksploatowanych obiektów pod kątem ich dodatkowego obciążenia. W swych analizach opierał się na wymaganiach normy niemieckiej dotyczącej konstrukcji stalowych [6-11] oraz zaleceniach ECCS [6-14].

W literaturze zagranicznej można znaleźć artykuły dotyczące tematyki niniejszej pracy. Należy tu wspomnieć o pracach Katanowa i Popowskiego [6-38] gdzie analizowano możliwość dodawania dodatkowych pierścienia usztywniających dla powłok z defektami kształtu. Również Szymanowski wraz z Gordeyevem i Yurasem [6-78] prezentują podobne zastosowanie pierścieni przy remoncie zbiornika. Efektami wpływu osiowo symetrycznych imperfekcji stalowych cylindrów zajmowali się Berry, Bridge oraz Rotter [6-5].

Zagadnienia cienkich powłok z uwzględnieniem losowego charakteru geometrii są przedmiotem pracy Skowronka [6-79], który przedstawił sformułowanie liniowego wariantu teorii cienkich powłok sprężystych z uwzględnieniem losowych zmian geometrii i obciążenia zewnętrznego.

Techniczne podejście do imperfekcji – przyczyn ich powstawania oraz możliwe do zastosowania sposobów ich ograniczenia przedstawił Ziółko w swoim artykule [6-102].

6.2.4. Losowe rozkłady imperfekcji geometrycznych

Problem określenia rozkładu imperfekcji początkowych powłok walcowych dla konstrukcji zbiorników magazynowych był już poprzednio przedmiotem zainteresowań badaczy. Rozwijany był on w dobie pojawienia się dostępu do maszyn cyfrowych. Opracowywane były wówczas programy komputerowe do symulowania powierzchni zbiorników walcowych na podstawie losowych odchyłek początkowych. Zakładano, iż rozkład imperfekcji geometrycznych powierzchni może być aproksymowany rozkładem normalnym Gaussa. Problemy opracowania takich algorytmów i zastosowane metody zostały opisane przez takich autorów jak: Filipow [6-15], [6-17], Orlik [6-65], [6-66], Wilde [6-88] już w latach siedemdziesiątych. Również obecnie przedstawiane są publikacje o symulowaniu i analizie wartości imperfekcji np. Górski [6-25], [6-26]. Na bazie opracowanych zbiorów niedokładności realizowane były różnego rodzaju zagadnienia np. stateczności [6-16].

6.3. Remonty zbiorników

W literaturze związanej z konstrukcjami zbiornikowymi można znaleźć przykłady realizacji inżynierskich związanych z naprawą kształtu płaszczy zbiorników magazynowych, zarówno o dachach pływający jak i stałych. Główną przyczyną podejmowania takich napraw są przede wszystkim problemy eksploatacyjne, w drugiej zaś kolejności brane są pod uwagę zagadnienia wytrzymałościowe. Wiele z tych realizacji prezentowanych jest na łamach artykułów autorstwa Ziółko [6-97], [6-101], [6-103], [6-104], [6-106], [6-107], [6-108], [6-109], [6-110], [6-111]. Na podstawie tych publikacji można przeanalizować wielkości charakterystycznych deformacji istniejących na obiektach magazynowych jak i podjętych z pełnym sukcesem procesów naprawczych.

6.4. MES w analizie powłok z defektami kształtu

Rozwój metod numerycznych pozwolił na dokładniejsze analizowanie przypadków powłok z imperfekcjami początkowymi. W tym miejscu należy wspomnieć prace Gołasia z zakresu metod elementów skończonych i przeprowadzone przez niego analizy [6-20], [6-21], [6-22]. Przedmiotem opracowań autora były numeryczne rozwiązania dla powłok obrotowo-symetrycznych również uwzględniające wady geometryczne lecz o charakterze obrotowo-symetrycznymi, czyli posiadającymi jednakowe cechy na całym obwodzie obiektu [6-23], [6-24]. Dla celów porównawczych warto wspomnieć o pracach z zakresu nieliniowej analizy

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 44
--	--	----------------------------

numerycznej powłoki o kształcie hiperboloidy obrotowej wykorzystywanej w przypadku chłodni kominowych. W pracach tych wielokrotnie poruszano problem wpływu różnych rodzajów imperfekcji na rozkłady sił wewnętrznych [6-1], [6-67], [6-80], [6-87] jak również zmiany charakteru obciążenia wiatrem [6-81]. Pomimo, iż prace dotyczą konstrukcji bez obciążenia hydrostatycznego to obciążenia wiatrem oraz ciężarem własnym występują zawsze w przypadku powłok bezmomentowych jakim jest zasadnicza część płaszcza zbiornika. Prace te dobrze pokazują kierunki oraz sposoby wykonywania analiz na drodze numerycznej. Na ich podstawie można również ocenić jaki wpływ mają imperfekcje. Materiałem tym posłużono się w niniejszej pracy fakultatywnie. W ramach rozwoju metody elementów skończonych należy wspomnieć o pracach Konderli [6-40], [6-41], [6-42] oraz Waszczyzyna [6-86], [6-87] i Radwańskiej [6-74] analizujących zagadnienia dużych przemieszczeń ustrojów powierzchniowych. Analizy stanu naprężeń wykonane metodą elementów skończonych są przedmiotem niniejszej pracy i wcześniejszych własnych publikacji autora niniejszej dysertacji [6-44].

6.5. Normy odbioru konstrukcji zbiornikowych

Na zakończenie niniejszego przeglądu literatury, w tablicach 6.1 i 6.2, zamieszczonych na kolejnych stronach, podano zestawienie normowych wymagań dotyczących odbioru konstrukcji płaszcza zbiornika opracowane na podstawie różnych norm. Zestawienie to obrazuje jak określone są, w różnych przepisach, rodzaje wad kształtu oraz podaje ich dopuszczalne wartości jak i sposoby ich określania. Wartości te zestawiono tylko dla analizowanego w pracy typu zbiornika i jego wielkości.

Tablica. 6.1. Zestawienie dopuszczalnych normowo wartości imperfekcji dla powłoki płaszcza zbiornika

Lp.	Opis odchyłki	PN-B-03210 : 1997		API 650		BS 2654:1984		DIN 4119
		D= 10 ÷ 20 m	D > 50 m	D= 12,3 ÷ 45,7 m	D > 45,7 m	D=12,5 ÷ 45 m	D > 45 m	
1	Odchyłka od średnicy nominalnej blisko dna							$\pm 0,001 \cdot D$ max ± 40
2	Odchyłka promienia w poziomie dna					± 19 mm	± 25 mm	
3	Odchyłka średnicy wewnętrznej na wysokości 300 mm nad dnem	± 25 mm	± 60 mm					
4	Odchyłka promienia wewnętrznego na wysokości 300 mm nad dnem			$\pm 37,5$ mm	± 50 mm			
5	Odchyłka średnicy na poziomie górnej krawędzi płaszcza	± 30 mm	$\pm 0,0020 \cdot D$					± 80 mm
6	Strzałka odchylenia tworzącej płaszcza od pionu	$\pm 0,0050 \cdot h$	$\pm 0,0045 \cdot h$	$\pm 0,0050 \cdot h$				$\pm 0,0050 \cdot h$ max ± 80
7	Odchylenie osi zbiornika od pionu							$\pm 0,002 \cdot h$
8	Miejscowe odchylenia od formy cylindrycznej mierzona szablonem poziomym o długości L	L = 2000 mm $\Delta = 20$ mm	L = 900 mm $\Delta = 12,5$ mm					L = 500 mm $\Delta = 10$ mm
9	Miejscowe odchylenia od formy cylindrycznej mierzona szablonem pionowym o długości L	L = 2000 mm $\Delta = 20$ mm	L = 900 mm $\Delta = 12,5$ mm					L = 500 mm $\Delta = 10$ mm

Objaśnienia do tablicy 6.1
 D - średnica płaszcza zbiornika,
 h - wysokość płaszcza zbiornika

Tablica 6.2. Wartość tolerancji wykonania płaszczu zbiornika wg EN 1993-1-6:2004 [6-117]

L.p.	Klasa jakości wykonania	Opis klasy jakości wykonania	$U_{r,max}$
			Średnica zbiornika $d \geq 1,25$ m
1	Klasa A	wspaniała	0,007
2	Klasa B	wysoka	0,010
3	Klasa C	normalna	0,015

gdzie:

$$U_r = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{nom}} \leq U_{r,max} \quad [6.3]$$

d_{min} - minimalna, zmierzona wewnętrzna średnica zbiornika,
 d_{max} - maksymalna, zmierzona średnica wewnętrzna zbiornika,
 d_{nom} - teoretyczna, wewnętrzna średnica zbiornika.

7. Badania tensometryczne walcowej powłoki płaszcza

W celu identyfikacji zakresu zmienności stanu naprężeń w powłoce rzeczywistego zbiornika z imperfekcjami geometrycznymi kształtu przeprowadzono testy z użyciem tensometrycznych metod pomiarowych. Badanie wykonano na przełomie marca i kwietnia 2000 roku. badania zmiany stanu naprężeń w stalowej powłoce walcowej przeprowadzono na płaszczu zbiornika magazynowego o pojemności 12.000 m³. Do badań został wykorzystany zbiornik przeznaczony do demontażu, którego okres nieprzerwanej eksploatacji wynosił niespełna 40 lat.

7.1. Tensometryczna metoda pomiaru

Metoda pomiaru tensometrycznego oparta jest na zdolności materiału konstrukcyjnego do przeciwstawiania się działaniu obciążenia zewnętrznego wyrażonego w postaci jego odkształcenia. Znajomość odkształcenia sprężystego materiału występujących pod wpływem obciążenia pozwala na ocenę stanu naprężenia w istniejącej konstrukcji według powszechnie znanych wzorów.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (7-1)$$

w którym

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (7-2)$$

Pomiar odkształceń za pomocą tensometrów oporowych realizowany jest jako pomiar bardzo małych zmian wartości rezystancji spowodowanych niewielkimi odkształceniami drutu oporowego, z którego wykonany jest tensometr. Między rezystancją drutu oporowego R, jej zmianą ΔR a jednostkowym odkształceniem ε drutu oporowego, odpowiadającego odkształceniu badanej konstrukcji zachodzi następująca zależność:

$$\frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = k \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{\Delta R/R}{k} \quad (7-3)$$

gdzie:

k - współczynnik czułości odkształceniowej tensometru

ε - jednostkowe odkształcenie

Wartość współczynnika czułości odkształceniowej „k” jest zależna od właściwości fizycznych stopu, z którego wykonano drut oporowy tensometru. Współczynnik „k” zachowuje stałą wartość w pewnych granicach doznawanych odkształceń. Współczynnik ten dla wykorzystanych tensometrów o uzwojeniu wężykowym wynosi 2,05. Metoda badań tensometrycznych daje dokładne wyniki pomiarów jedynie w granicach przenoszonych przez niego odkształceń. Dla zastosowanych tensometrów wężykowych granica ta wynosi co najmniej 0,50%, co dla stali konstrukcyjnej niestopowej i niskostopowej odpowiada naprężeniu

aż $\sigma=1050$ MPa, czyli daleko poza zakresem wytrzymałości. W celu wyeliminowania wpływu zmian temperatur, jakie występują w trakcie wykonywania pomiarów, stosuje się tensometry kompensacyjne. Tensometr kompensacyjny nakleja się na płytce wykonanej z tego samego materiału, z jakiego wykonany jest badany obiekt, na którym naklejono tensometr pomiarowy [7-5], [7-6].

7.2. Ogólna charakterystyka badanego zbiornika

Przedmiotem badania był zbiornik naziemny, walcowy o osi pionowej z dachem pływającym typu pontonowo – membranowego (rys. Z1-1). Pojemności nominalna zbiornika wynosiła 12.000 m^3 . Zasadnicze wymiary konstrukcji zbiornika były następujące:

- średnica wewnętrzna płaszczu $D = 36,60 \text{ m}$,
- wysokość płaszczu $H = 11,80 \text{ m}$.

Badany zbiornik składał się z ośmiu pierścieni blach tworzących płaszcz o grubościach podanych w poniższej tabeli:

Tablica 7.1. Grubości blach płaszczu zbiornika

Nr pierścienia	Zakładana pierwotna grubość blach [mm]	Pomierzona w trakcie badań, rzeczywista grubość blach [mm]
1	18	16,9
2	16	15,0
3	14	13,3
4	11	10,1
5	9	7,9
6	7	6,1
7	7	6,1
8	7	6,3

Średnia wysokość blach z których wykonano pierścienie płaszczu zbiornika wynosiła 1470 mm . Arkusze blach płaszczu zbiornika łączone były przy zastosowaniu spoin czołowych. Płaszcz zbiornika został wykonany metodą arkuszową. Płaszcz połączony był u podstawy z pierścieniem obrzeżnym dna zbiornika za pomocą obustronnych spoin pachwinowych grubości 5 mm . Płaszcz zbiornika zwieńczony został kątownikiem $80 \times 80 \times 8 \text{ mm}$. Połączenie blach płaszczu zbiornika z kątownikiem wykonano jako zakładkowe, stosując spoiny pachwinowe. W górnej części płaszczu zbiornika, na ostatnim pierścieniu, na wysokości około 60 cm poniżej kątownika wieńczącego wykonano było stężenie wiatrowe (pierścień) (rys. Z1-1). Pierścień ten był wykonany z blachy stalowej grubości 6 mm i zakończony ceownikiem o wysokości 80 mm .

Dno zbiornika składało się z pierścienia obrzeżnego wykonanego z blach grubości 9 mm oraz z części środkowej z blach grubości 7 mm . Blachy tworzące elementy składowe

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 38
--	--	----------------------------

obrzeżnego pierścienia dna połączone zostały pomiędzy sobą spoinami czołowymi. Blachy tworzące środkową części dna zbiornika łączone były w stykach poprzecznych - doczołowo z zastosowaniem spoiny czołowej, oraz na zakładkę w stykach podłużny. Powierzchnia dna zbiornika była lekko pofalowana i miała wyraźnie zaznaczony spadek skierowany na zewnątrz.

Zbiornik posadowiony był w całości na fundamencie piaskowym, który był okolony żelbetowym pierścieniem fundamentowym, co odpowiada fundamentowi typu „a” wg rysunku 4-1 niniejszej pracy.

Zbiornika wyposażony był w dach pływający typu pontonowo – membranowego, który został wykonany w całości z blach o grubości 5 mm (*rys. Z1-1*).

Badany obiekt został wybudowany w latach 1961 - 63 i do 1963 roku był nieprzerwanie eksploatowany. W analizowanym zbiorniku magazynowano surową ropę naftową o ciężarze właściwym $8,70 \text{ kN/m}^3$.

7.3. Ocena deformacji powierzchni płaszczu zbiornika i źródła ich pochodzenia

Powierzchnia płaszczu zbiornika była bardzo pofalowana. Deformacje kształtu powierzchni płaszczu zbiornika pochodzą zarówno z okresu budowy obiektu jak i okresu późniejszej, prawie czterdziestoletniej, eksploatacji. Deformacje pochodzące z okresu budowy to przede wszystkim załamania kątowe na stykach spawanych zarówno pionowych jak i poziomych płaszczu zbiornika. Drugim powodem powstawania deformacji jest niedokładność wytyczenia ustawienia pierwszego pierścienia płaszczu na stalowym pierścieniu obrzeżnym dna zbiornika. Odchyłki od centrycznego ustawienia pierwszego pierścienia płaszczu wynoszą od: - 57 mm do 56 mm, co daje zmianę całkowitą długości promienia dochodzącą do 113 mm już na poziomie dna zbiornika. Konsekwencją niecyldryczności już pierwszego pierścienia płaszczu jest ustawianie kolejnych pierścieni płaszczu na złej bazie. Sumowanie się niedokładności trasowania i ustawienia każdego kolejnego pierścienia tworzącego płaszcz powoduje wzrost wartości deformacji powłoki walcowej.

Kolejną przyczyną powstawania nowych deformacji lub pogłębianie się już istniejących jest proces nierównomiernego osiadania zbiornika na fundamencie piaskowym. Związane jest to ze stopniem zagęszczenia fundamentowej poduszki piaskowej oraz z wartością obciążenia skupionego pochodzącego od ciężaru własnego płaszczu zbiornika. Zmienny stopień zagęszczenia fundamentowej poduszki piaskowej należy upatrywać w niskiej jakości wykonawstwa robót ziemnych realizowanych na etapie budowy oraz we wpływie oddziaływań atmosferycznych w trakcie całego okresu eksploatacji obiektu. Zmiany temperatury, szczególnie zamarzanie i odmarzanie zawilgoconej części gruntu znajdującego się w bezpośrednim

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 39
--	--	----------------------------

sąsiedztwie pierścienia okalającego powodują rozluźnienie gruntu. Stopień zagęszczenia gruntu w fundamencie piaskowym dla opisywanego zbiornika został określony doświadczalnie, na podstawie pomiarów geotechnicznych wpędu stożkowej sondy dynamicznej. Stopnie zagęszczenia poduszki piaskowej fundamentu w górnej, pięćdziesięciocentymetrowej warstwie wynoszą odpowiednio:

- w części obrzeżnej – $I_D = 0,48 - 0,56$,
- w części środkowej – $I_D = 0,61 - 0,62$.

Stopień zagęszczenia fundamentu piaskowego wzrasta wraz z głębokością i na poziomie dwóch metrów poniżej dna zbiornika osiąga wartość $I_D = 0,8$.

Osiadanie obwodu płaszcza zbiornika wynosiło od: -18 do 31 mm, co daje zakres zmienności 49 mm .

Łączne deformacje płaszcza zbiornika w odniesieniu do teoretycznej tworzącej płaszcza pochodzące od niedokładności wykonania, wad spawalniczych oraz nierównomiernego osiadania wahają się w przedziale: od -169 (imperfekcje skierowane do wnętrza) do 149 mm (imperfekcje skierowane na zewnątrz) co daje obszar zmienności deformacji o wymiarze 319 milimetrów w górnej części obiektu. Wielkości powyżej przedstawionych imperfekcji podano w odniesieniu do teoretycznej tworzącej walcową powłokę płaszcza zbiornika.

Stan deformacji analizowanego płaszcza zbiornika oraz ich przebieg został przedstawiony w załączniku numer 1-3 w postaci wykresów oraz w załączniku 1-5 w postaci dokumentacji fotograficznej. Załączone wykresy obrazują kształt powierzchni płaszcza pustego zbiornika w dniu 23.03.2000 roku. Charakter deformacji został przedstawiony w załączniku numer jeden na przekrojach poziomych (*rys. Z1-4 do Z1-6*) oraz pionowych (*rys. Z1-7 do Z1-10*). Na wykresach – rysunki od Z1-11 do Z1-12 przedstawiono mapy deformacji powierzchni płaszcza zbiornika z rozbiciem na odchyłki skierowane do wnętrza zbiornika – odchyłki ujemne - i na zewnątrz – odchyłki dodatnie. Na mapach tych podano usytuowanie pionów na których wykonywano pomiarowych tensometryczne. Dla lepszego zobrazowania pomierzonych deformacji powierzchni płaszcza zbiornika wykonano przestrzenny wykres deformacji (*rys. Z1-13*).

7.4. Zakres i przebieg badań

Zbiornik został poddany próbie obciążenia wodą (o ciężarze właściwym $9,81 \text{ kN/m}^3$). W trakcie wypełniania zbiornika cieczą rejestrowano elektronicznie, za pośrednictwem czujników elektrooporowych, zmiany stanu odkształcenia w blachach płaszcza zbiornika w miejscach montażu czujników.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 40
--	--	----------------------------

W ramach zrealizowanych prac badawczych zostały wykonane następujące prace przygotowawcze i pomiarowe:

- a) pomiary geodezyjne deformacji płaszczu zbiornika – wykonano na 40 pionach pomiarowych rozłożonych równomiernie na obwodzie zbiornika. Na każdym pierścieniu płaszczu zbiornika pomiary geodezyjne wykonano na trzech poziomach – (na krawędzi dolnej, w środku wysokości, na krawędzi górnej), dodatkowo wykonano pomiar na wysokości 300 ponad dnem zbiornika. Pomiar ten jest wymagany zgodnie z normą [7-4],
- b) pomiary geodezyjne niwelacji obwodu płaszczu zbiornika – wykonano na 40 punktach pomiarowych rozmieszczonych równomiernie na obwodzie zbiornika. Pomiary te wykonano dokładnie w osi tworzących, na których mierzono wartości deformacji płaszczu,
- c) analiza deformacji płaszczu zbiornika – na podstawie pomiarów geodezyjnych deformacji powierzchni płaszczu zbiornika oraz niwelacji obwodu dokonano oceny stopnia zdeformowania obiektu. Wyniki pomiarów geodezyjnych posłużyły do opracowania komputerowego modelu zbiornika, przy zastosowaniu programu Robot V6. Pomiary posłużyły do określenia deformacji płaszczu zbiornika - zał. 1-3 jak również do opracowań statystycznych przedstawionych w załączniku nr 1-4. Komputerowa analiza modelu numerycznego zbiornika przy zastosowaniu powłokowych elementów skończonych pozwoliła na wstępne oszacowanie rozkładu sił wewnętrznych oraz naprężeń w zdeformowanej powłoce. Na podstawie w/w rozkładów sił wewnętrznych zaproponowano wykonanie trzech tensometrycznych pionów pomiarowych określając ich położenie. Na etapie tym nastąpiło uszczegółowienie warunków wykonania przyszłych prac pomiarowych.

Na każdym pierścieniu płaszczu zbiornika przewidziano do zainstalowania po trzy tensometry liniowe. Tensometry montowano na krawędzi górnej i dolnej każdego pierścienia w odległości około 20 mm od spoin poziomych i co najmniej 150 mm od spoin pionowych. Tensometry instalowano również w połowie wysokości każdego pierścienia płaszczu.

W trakcie montażu tensometrów zdecydowano o zwiększeniu liczby punktów pomiarowych. Dodatkowe tensometry o poziomym kierunku pomiaru usytuowano na pierścieniu 5 i 6 w obrębie pionu pomiarowego numer 1. Tensometry te usytuowano po obu stronach pionu pomiarowego w odległości 3 m.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 41
--	--	----------------------------

Dodatkowymi punktami pomiarowymi były również pojedyncze tensometry o pionowym kierunku pomiaru zamontowane na każdym z pionów pomiarowych w miejscach największych załamań kątowych występujących pomiędzy blachami tworzącymi płaszcz zbiornika. Tensometry te usytuowano przy spoinach poziomych.

- d) pomiary grubości blach płaszczu zbiornika – pomiary grubości blach płaszczu zbiornika, na których zostały zamontowane tensometry, wykonano w trakcie ich montażu. Pomiarów dokonano metodą ultradźwiękową przy wykorzystaniu grubościomierza ultradźwiękowego typu UPM o dokładności pomiarowej wynoszącej 0,1 mm . Pomiar wykonany przez autora niniejszej pracy. Pomiarów tych dokonano w bezpośrednim sąsiedztwie montowanych tensometrów (rys. Z1-32, Z1-39, Z1-42).
- e) montaż elektrooporowych tensometrów foliowych – montaż tensometrów elektrooporowych na stalowej konstrukcji zbiornika wraz z ich okablowaniem został wykonany przez wyspecjalizowanych, w tego typu pracach, pracowników Katedry Mostów Politechniki Gdańskiej przeprowadzających badania, wg programu opracowanego przez autora dysertacji. Prace obejmowały dokonanie umieszczenia punktów pomiarowych na obiekcie, odpowiednie oczyszczenie powierzchni blach, przyklejenie tensometrów oraz ich okablowanie. Zainstalowano również tensometry kompensujące zmiany temperatury płaszczu badanego zbiornika na skutek różnic temperatury powietrza atmosferycznego jak i cieczy wypełniającej.
- f) ocena deformacji płaszczu zbiornika w obrębie pionów pomiarowych – w trakcie prac montażowych związanych z naklejeniem tensometrów dokonano oceny deformacji płaszczu – występujące deformacje płaszczu, oraz rozmieszczenie tensometrów pomiarowych względem elementów płaszczu zbiornika zostało przedstawione w dokumentacji fotograficznej, oddzielnie dla każdego pionu, stanowiącej załącznik nr 1-5 do niniejszej pracy.
- g) przebieg badań - pomiary zmiany stanu naprężenia w powłoce płaszczu zbiornika przewidywano wykonać dla dwóch pełnych cykli pomiarowych (tj. dwóch cykli napełnienia i opróżnienia zbiornika). Celem tak przyjętej techniki pomiaru miało być sprawdzenie czy każdorazowo wartości naprężeń na zewnętrznej powłoce zbiornika osiągną tą samą wartość przy identycznym poziomie cieczy wypełniającej obiekt. Warunki pogodowe (rys. Z1-49 ÷ Z1-51) jak i przyczyny techniczne ograniczyły prace do jednego pełnego cyklu i początku napełnienia w cyklu drugim. W trakcie całego

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 42
--	--	----------------------------

pierwszego cyklu badań temperatura powietrza atmosferycznego była ustabilizowana. Różnice dobowe zmiany temperatury wynosiły około 5°. Rejestracja zmian wartości naprężeń w płaszczu zbiornika realizowana była automatycznie, co 15 minut. Po analizie otrzymanych z pomiarów wartości naprężeń do dalszych opracowań przyjęto pomierzone naprężenia z pierwszego cyklu pomiarowego obejmującego napełnienia i opróżnienie zbiornika. W załączniku nr 1-6 podano wykresy obrazujące wartości naprężeń zarejestrowanych w trakcie całego czasokresu prowadzenia pomiarów.

7.5. Omówienie wyników badań terenowych

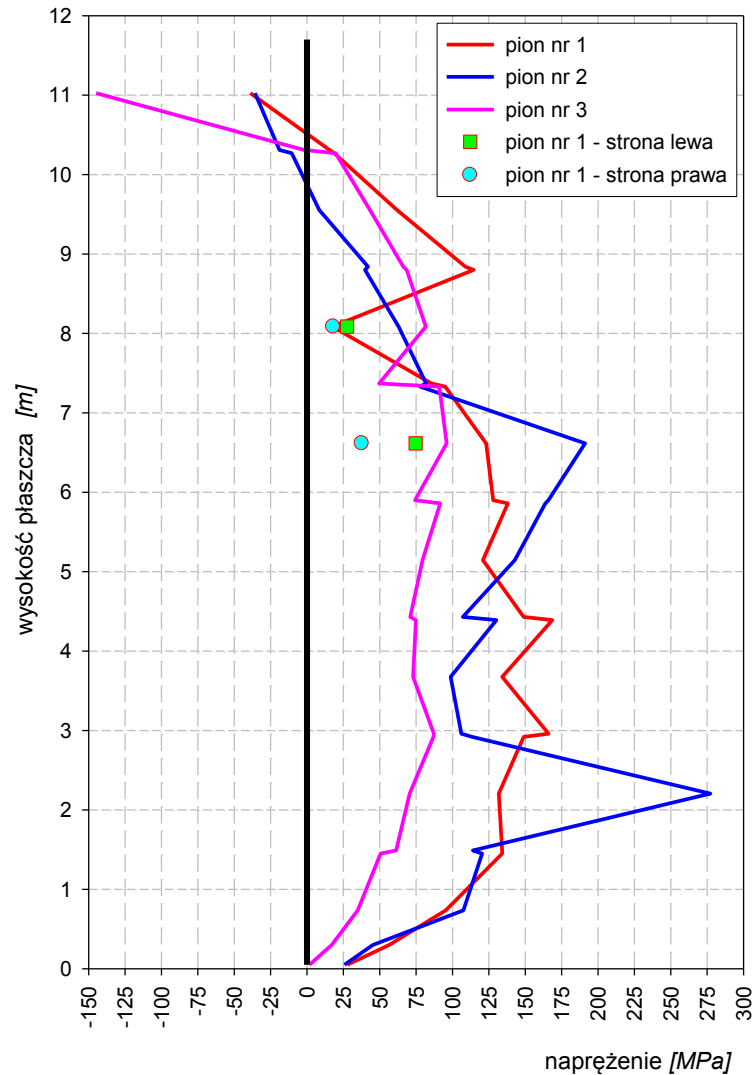
Zbiornik, który był przedmiotem badań należał do bardziej zdeformowanych obiektów z tej grupy konstrukcji stalowych. Deformacje płaszcza zbiornika są znaczne. Przy zastosowaniu standaryzowania wielkości deformacji rzeczywistą grubością blach płaszcza zbiornika uzyskujemy następujące ich wielokrotności (*rys. Z1-19*):

- 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.

Takie wartości imperfekcji powodują występowanie znacznych mimośrodków pomiędzy poszczególnymi fragmentami pierścieni płaszcza zbiornika. Tak znaczne deformacje powodują generowanie w powłoce walcowej płaszcza zbiornika nie tylko sił obwodowego rozciągania, które są zasadniczymi siłami dla obiektu, ale także znacznej wartości sił pionowych oraz momentów zginających.

Szczegółowe wyniki tensometrycznych badań terenowych zestawiono w załączniku nr 1-6. Zbiorcze zestawienie wyników, w przeliczeniu na naprężenia wg wzoru (*6-1*), podano w tablicy 7-2 zamieszczonej na kolejnej stronie. Naprężenia pomierzone na trzech pionach pomiarowych badanego zbiornika z deformacjami przedstawiono graficznie (*rys. 7-1*).

Na podstawie zamieszczonego tu wykresu przedstawiającego zasadniczo naprężenia obwodowego rozciągania powłoki płaszcza zbiornika można stwierdzić znaczne zróżnicowanie w stanach naprężeń tak poszczególnych pionach, jak i znaczne różnice na tych samych poziomach. Różnice otrzymanych wartości naprężeń są niejednokrotnie dwukrotne. Charakter poniższych wykresów, utworzony z maksymalnych wartości naprężeń określonych na podstawie pomiarów odkształcenia wykonanych w trakcie próby wodnej, znacznie odbiega, w ogólnym zarysie, od zakładanych przebiegów teoretycznych. Porównanie wyników uzyskanych z badań terenowych z analizami numerycznymi będzie wykonane w rozdziale dziewiątym niniejszej pracy.



Rys. 7-1. Zestawienie maksymalnych wartości pomierzonych naprężeń

Dodatkowo, dla czterech punktach pomiarowych, w których dokonano pomiaru odkształceń obwodowych jak i pionowych, naprężenia wypadkowe określono wg poniższych formuł (7-4) i przedstawiono w tablicy 7.3:

$$\sigma_x = \frac{1}{1-\nu^2} \cdot (\sigma_o + \nu \cdot \sigma_v)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{1-\nu^2} \cdot (\sigma_v + \nu \cdot \sigma_o)$$
(7-4)

gdzie:

ν - współczynnik Poissona dla stali ($\nu=0,3$)

σ_o - naprężenia obwodowe wg wzoru (6-1) uzyskane z badań i podane w tab. 7-2

σ_v - naprężenia pionowe wg wzoru (6-1) uzyskane z badań i podane w tab. 7-2

Tablica. 7.2. Maksymalne wartości naprężeń

Numer pierścienia	Numer poziomu pomiarowego	Wysokość płaszczu [m]	Maksymalne wartości naprężeń w powłoce płaszczu zbiornika z imperfekcjami geometrycznymi określone na podstawie pomierzonych odkształceń [MPa] wg wzoru (6-1)									
			Pion pomiarowy									
			I			II			III			
8	17	11,03		-38,9			-35,7			-144,9		
	16b	10,31		15,6			-18,9			-1,9		
7	16a	10,27		18,7			-10,5			19,7		
	15	9,56		61,8			8,4			43,3		
	14b	8,84		108,9			42,0			66,2		
6	14a	8,80		114,5			39,9			68,5		
	13	8,09	27,6	17,5	18		63,0			81,7		
	12b	7,37		85,6		-126	81,9	-116		49,6		
5	12a	7,33		95,0	-66		77,7			90,9		
	11	6,62	74,7	123,1	37,7		191,1			96,0		
	10b	5,90		128,0	-81		165,9			74,3		
4	10a	5,86		138,1			163,8			91,6		
	9	5,15		120,9			142,8			79,4		
	8b	4,43		148,9			107,1			71,0		
3	8a	4,39		168,6			130,2			74,9		
	7	3,68		134,2			98,7			72,9		
	6b	2,96		166,0			106,1			87,2		
2	6a	2,92		148,9			113,4			86,9		
	5	2,21		131,8			277,2			70,6		
	4b	1,49		134,1			114,0			61,3		
1	4a	1,45		134,2			120,4			50,6		
	3	0,74		95,4			107,5			34,9		
	2	0,30		56,5			45,2			-		
	1	0,05		27,7			25,8			1,7		

Objaśnienia

dodatkowy tensometr ustawiony poziomo w odległości 3,0 m od pionu

tensometr ustawiony pionowo w pobliżu pionu

Tematyka przedstawionego badania tensometrycznego zbiornika z imperfekcjami geometrycznymi była przedmiotem wcześniejszych publikacji autora niniejszej pracy [7-1], [7-2], [7-3].

Tablica. 7.3. Zestawienie porównawcze naprężeń

Numer pierścienia Numer poziomu pomiarowego		Zestawienie porównawcze naprężeń powierzchniowych dla badanej powłoki określone wg różnych formuł [MPa]													
		Pion pomiarowy													
		I				II				III					
		wg wzoru (6-1)		wg wzoru (6-4)		wg wzoru (6-1)		wg wzoru (6-4)		wg wzoru (6-1)		wg wzoru (6-4)			
σ_o		σ_v		σ_x		σ_y		σ_o		σ_v		σ_x		σ_y	
6	12b					81,9		48,5		49,6		16,2			
							-126		-111,5		-116		-111,1		
5	12a	95,0		76,3											
			-66		-41,2										
	10b	128,0		113,9											
			-81		-46,8										

Jak pokazano w powyższej tabelicy uwzględnienie wzajemnej korelacji odpowiednich stanów naprężeń według linowej teorii sprężystości dla płaskiego stanu odkształcenia prowadzi do zmniejszenia wartości naprężeń w obu analizowanych kierunkach. Tylko w przypadku naprężeń σ_y w pionie pomiarowym nr II i III uzyskano zbieżność wartości, lecz wydaje się ona być przypadkowa.

7.5.1. Ograniczenia przeprowadzonego testu

Przeprowadzony tensometryczny pomiar zmiany stanu naprężeń w badanej powłoce obarczony jest błędami samej metody pomiarowej jak i ilościowymi ograniczeniami sprzętowymi. Pomiar tensometryczny podaje jedynie informację o przyroście naprężenia w powłoce pod wpływem przyrostu obciążenia zewnętrznego poprzez pomiar odkształceń na jej powierzchni. Warunki przeprowadzonego jednostronnego pomiaru tensometrycznego przedstawiają łączne działanie efektu błonowego jak i zgięciowego występującego w powłoce z imperfekcjami. Efektów tych nie można odseparować. Fakt ten związany jest z brakiem technicznych możliwości instalacji dodatkowych punktów pomiarowych na wewnętrznej stronie badanej powłoki. Pomimo zasadniczego wytyżenia przekroju powłoki w kierunku obwodowym należy również badać odkształcenia w kierunku pionowym by w dalszych analizach móc uwzględnić całkowity stan naprężeń określony dla warunków płaskiego stanu naprężenia. Ograniczony, z przyczyn zewnętrznych, do jednego cyklu obciążenia pomiar naprężeń nie daje informacji o powtarzalności uzyskiwanych wartości ostatecznych.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 46
--	--	----------------------------

8. Statystyka imperfekcji

Materiał pochodzący z pomiarów geodezyjnych geometrii płaszczy zbiorników o pojemności 50 000 m³, o których mowa w poprzednim rozdziale, a zamieszczony w formie tabelarycznej w załączniku nr 2 niniejszej pracy, jest podstawą do opracowań statystycznych przedstawionych w niniejszym rozdziale. Wykonane opracowania statystyczne posiadanego materiału pomiarowego umożliwi przejście od informacji o właściwościach poszczególnych jednostek statystycznych - jakimi są pomiary w poszczególnych punktach konstrukcji, do informacji o cechach całej zbiorowości lub też jej wyodrębnionej części.

Posiadany materiał pomiarowy podzielono na następujące grupy z uwagi na cel jakim mają one służyć:

- grupa 1 – statystyka pomiarów wykonanych na kolejnych poziomach pomiarowych dla poszczególnych zbiorników – zbiorniki o numerach 1-14,
- grupa 2 – statystyka pomiarów wykonanych na wszystkich poziomach dotyczących każdego zbiornika osobno - dla zbiorników o numerach 1-14,
- grupa 3 – statystyka pomiarów wykonanych na poszczególnych poziomach pomiarowych w ujęciu grupowym dla zbiorników oznaczonych numerami odpowiednio „1-6” oraz „7-12”,
- grupa 4 – statystyka wszystkich pomiarów dotyczących globalnie zbiorników w grupach oznaczonych numerami „1-6” oraz „7-12”.

Dodatkowe grupowanie zbiorników ujętych w analizowanych grupach o numerach 3 i 4 wynika z faktu występowania różnic w konstrukcji samych obiektów, a tym samym różnic w wysokości wykonywania pomiarów. Natomiast zbiorniki o numerach 13 i 14 zostały wyłączone z tej zbiorowości z uwagi na fakt innego czasokresu wykonania pomiarów, okresu budowy jak i wymiarów geometrycznych jak w przypadku zbiornika numer 14.

Wyżej przedstawiony podział na kolejne grupy ma na celu znalezienie odpowiedzi na następujące pytania:

1. W jakim stopniu i zakresie zmienia się wartość deformacji na poszczególnych poziomach pomiarowych w ujęciu dla każdego zbiornika indywidualnie?
2. W jakim stopniu i zakresie zmienia się wartość deformacji na poszczególnych poziomach pomiarowych w ujęciu dla grup oznaczonych numerami „1-6” i „7-12” ?
3. W jaki sposób dokonać uszeregowania wzajemnego zbiorników i ich grup pod względem zdeformowania?

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 47
--	--	----------------------------

Statystyczne uporządkowanie posiadanego materiału pomiarowego pozwoli uzyskać informację o typowym zakresie obszaru zmienności deformacji dla konstrukcji nowopowstających, i pozwoli je odnieść do konstrukcji eksploatowanych od dłuższego czasu (takie jak zbiorniki nr 13, 14 i zbiornik poddany testom tensometrycznym opisany w poprzednim rozdziale).

Opracowania statystyczne zostały wykonane zasadniczo dla następujących stanów kontroli wykonania płaszczy zbiorników:

- stan deformacji płaszcza bezpośrednio po zakończeniu prac montażowych,
- stan deformacji i odkształceń płaszcza w czasie próby wodnej, przy zbiorniku wypełnionym wodą do poziomu eksploatacyjnego,
- stan deformacji po zakończeniu próby wodnej, czyli stan konstrukcji po jednokrotnym pełnym napełnieniu zbiornika.

Do opisu statystycznego posiadanej zbiorowości imperfekcji geometrycznych płaszczy zbiorników posłużono się w pierwszej kolejności analitycznymi metodami opisu statystycznego. W drugiej, zaś dokonano graficznego przedstawienia rozkładów pomierzonych imperfekcji dla w/w grup.

Imperfekcje geometryczne powłoki walcowej zbiornika w niniejszym rozdziale są w celach porównawczych analizowane w dwóch stadiach:

- I stadium - jako odchyłki względne (z uwzględnieniem znaku deformacji),
- II stadium – jako odchyłki bezwzględne (bez uwzględnienia znaku, jako wartości absolutne).

8.1. Analityczne metody opisu statystycznego zbiorowości

W zakresie analitycznych metod opisu statystycznego badanego zbioru wyników pomiarowych posłużono się charakterystykami statystycznymi opisującymi strukturę zbiorowości w postaci następujących miar: miar średnich, miar zmienności, miar koncentracji oraz miar asymetrii. Miary te zostały pokrótce scharakteryzowane w załączniku nr 3 do niniejszej pracy. Charakterystyka ta ma na celu przybliżenie interpretacji otrzymywanych w wyniku ich zastosowania odpowiednich wartości.

Szczegółowe obliczenia wg w/w miar z uwagi na swoją obszerność zostały zamieszczone w załączniku nr 3 do niniejszej pracy.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczyźnie stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 48
--	--	----------------------------

8.2. Graficzne metody analizy

W celu graficznej prezentacji rozkładów imperfekcji wykonano dla każdego zbiornika oddzielnie oraz dla wcześniej opisanych grup wykresy zawierające następujące informacje statystyczne:

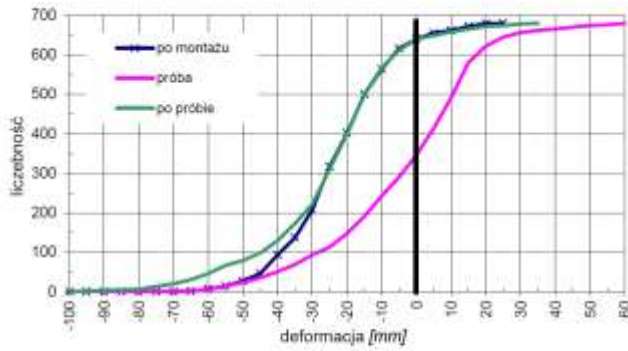
- sumaryczna częstość deformacji – wykres ten informuje o zakresie zmienności deformacji; na jego podstawie można określić liczebność deformacji w kreślonym przedziale oraz dokonać porównania zachowania się całej zbiorowości deformacji; dla konkretnego obiektu lub grupy w trzech stanach pomiarowych; tego typu wykres pozwala na określenie ogólnej tendencji imperfekcji poboczniczy zbiornika na podstawie skumulowanych liczebności deformacji o określonych wartościach, co jest widoczne na wykresach zarówno względnych jak i bezwzględnych wartościach deformacji,
- częstość deformacji – na wykresie tym przedstawiono liczebność deformacji w kolejnych przedziałach o rozpiętości 5 mm, z wykresu tego można określić kumulację oraz liczebność imperfekcji dla poszczególnych wielkości oraz dokonać próby oszacowania rodzaju rozkładu zbiorowości deformacji, wykorzystanie w tym przypadku wartości deformacji w ujęciu bezwzględnym pozwala na zobrazowanie z jaką liczbą deformacji ekstremalnych mamy do czynienia w badanej zbiorowości oraz określenia wielkości skumulowanej wartości deformacji,
- obszary zmienności – wykresy te wykonane zostały dla trzech pomierzonych stanów; informują o zmianach obszaru deformacji i odkształceń obiektu, ich wzajemna analiza pozwala na sprawdzenie jak zachowują się ekstremalne wartości deformacji w kolejnych stadiach pomiarowych oraz na porównanie zachowania się miary średniej jaką jest średnia arytmetyczna.

W rozdziale tym wykorzystano następującą literaturę [8-1], [8-2], [8-6], [8-7].

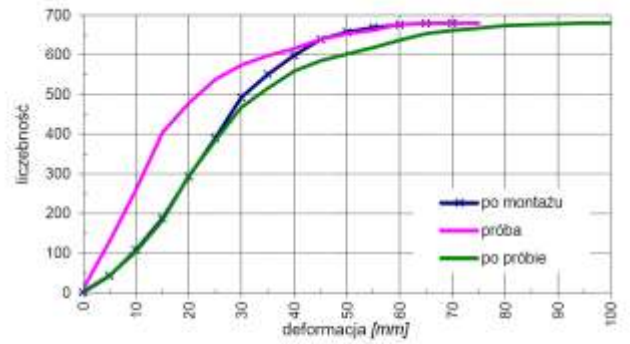
8.3. Analiza graficzna imperfekcji

Wykresy obrazujące wyżej wymienione rozkłady imperfekcji przedstawiono na kolejnych stronach.

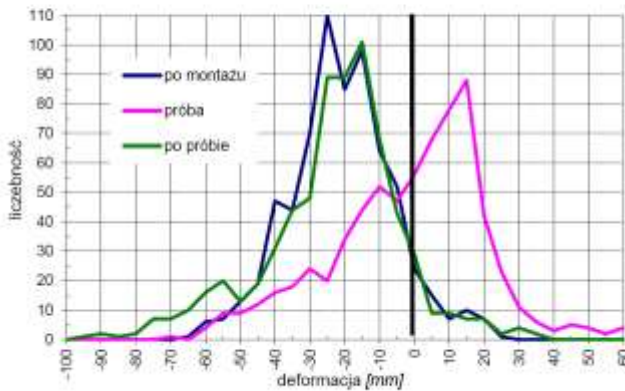
Zbiornik nr 1



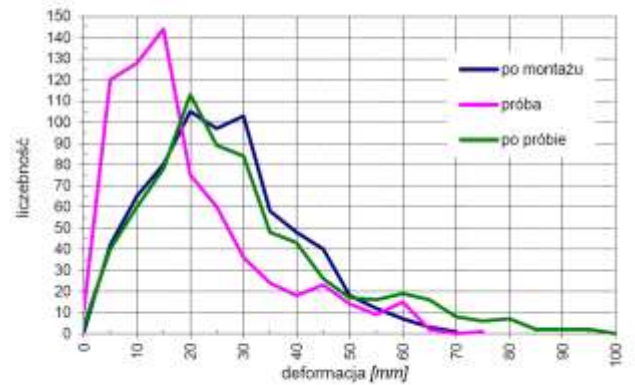
Rys. 8-1. Sumaryczna częstość deformacji



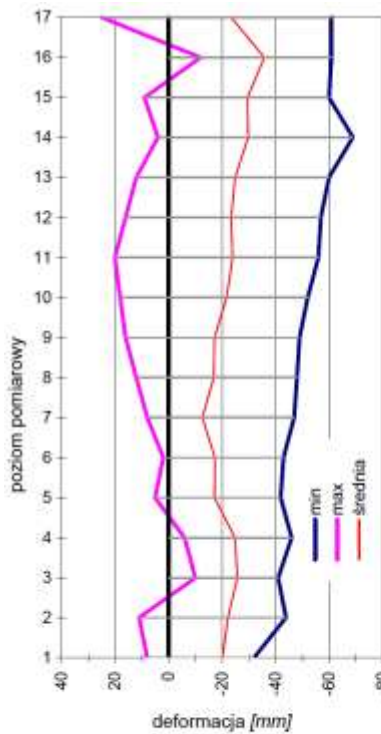
Rys. 8-2. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



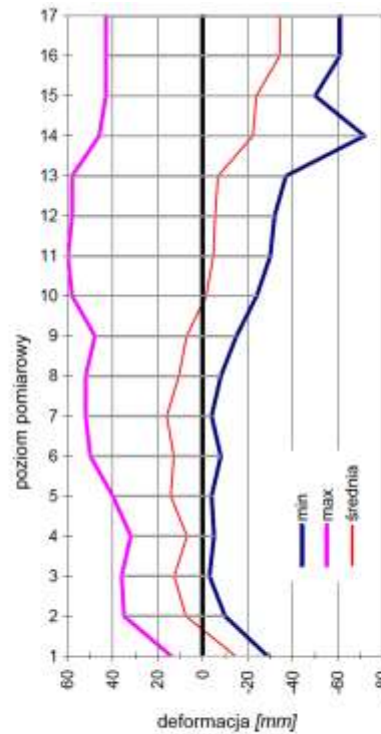
Rys. 8-3. Częstość deformacji



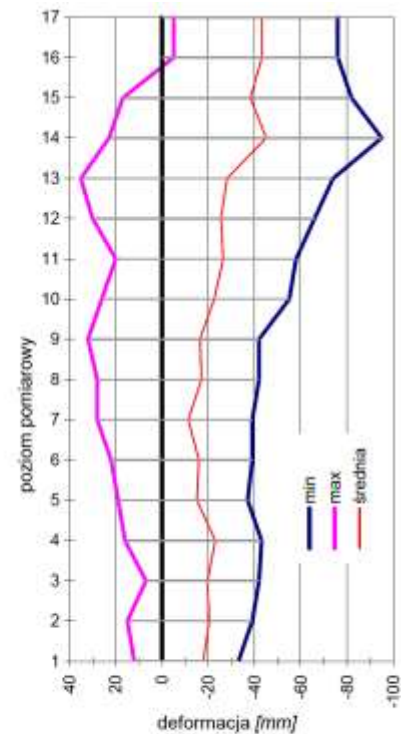
Rys. 8-4. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



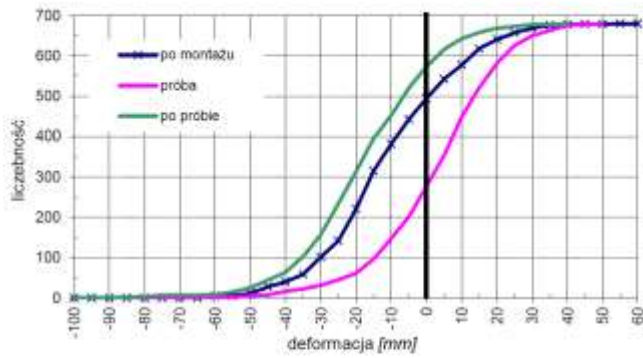
b) podczas próby



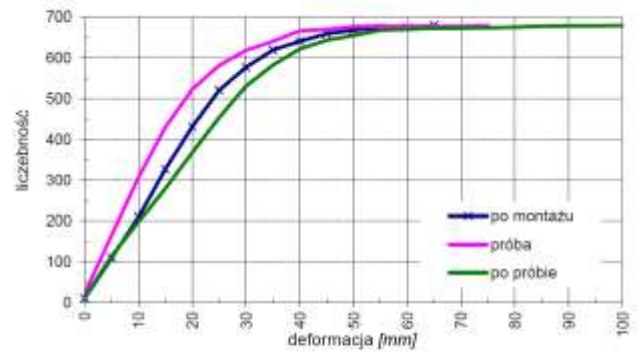
c) po próbie

Rys. 8-5. Obszar zmienności deformacji

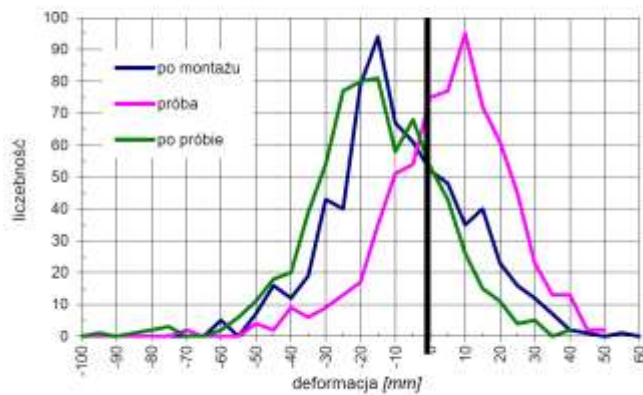
Zbiornik nr 2



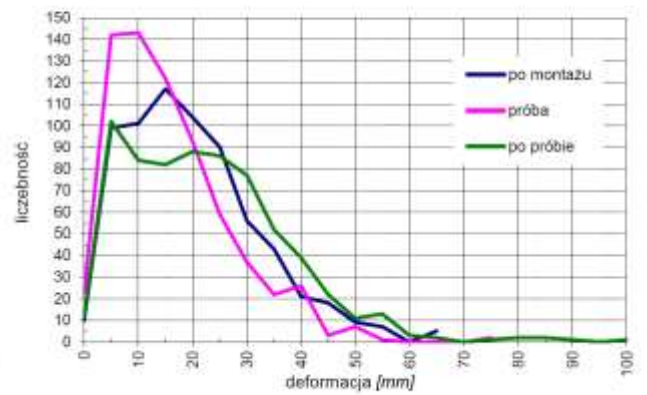
Rys. 8-6. Sumaryczna częstość deformacji



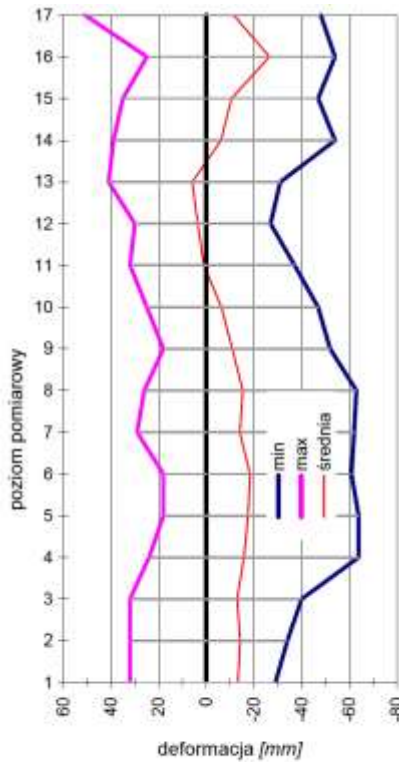
Rys. 8-7. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



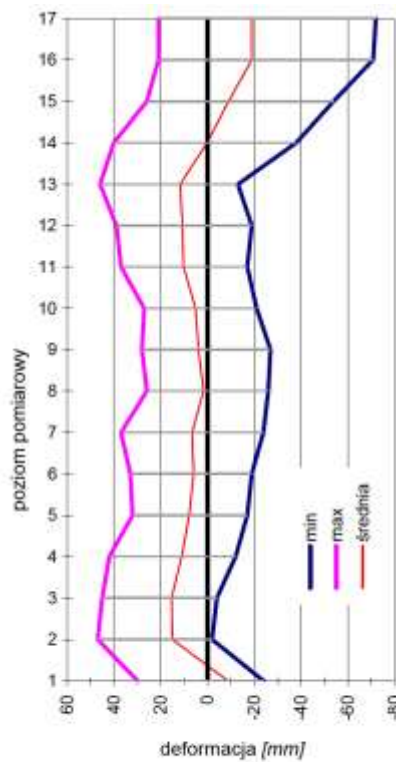
Rys. 8-8. Częstość deformacji



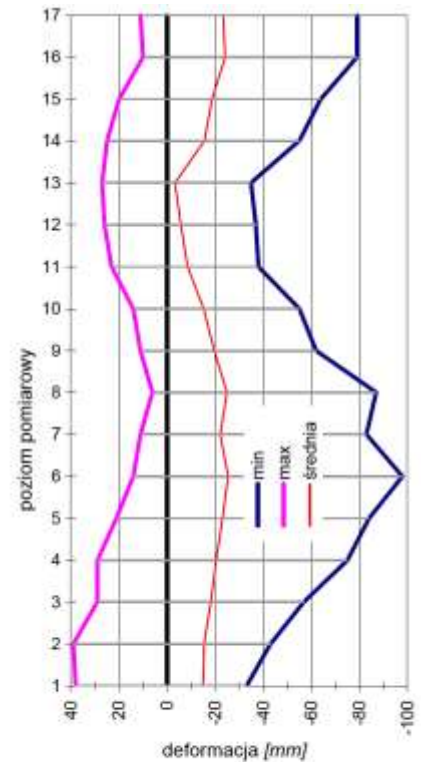
Rys. 8-9. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



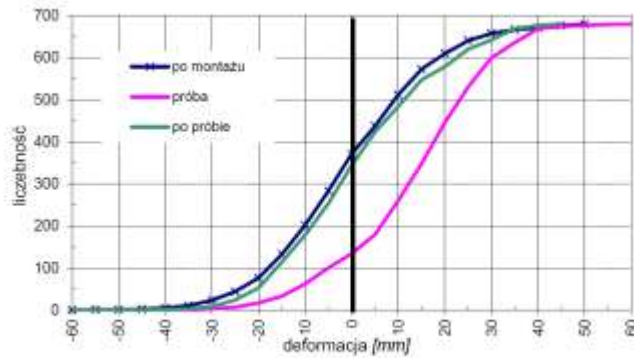
b) podczas próby



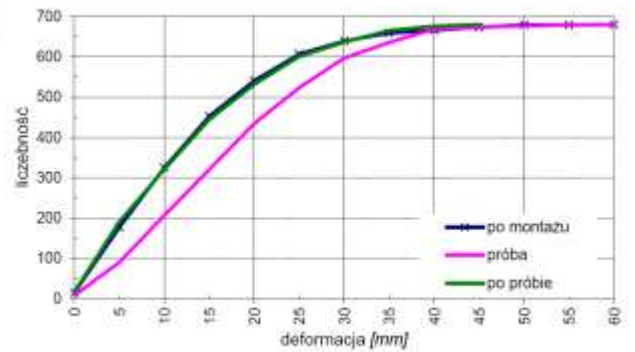
c) po próbie

Rys. 8-10. Obszar zmienności deformacji

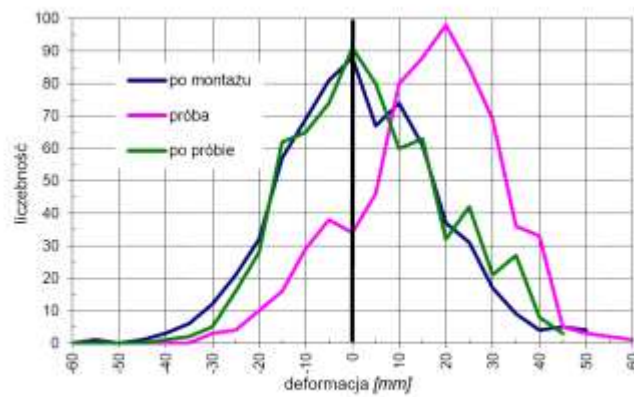
Zbiornik nr 3



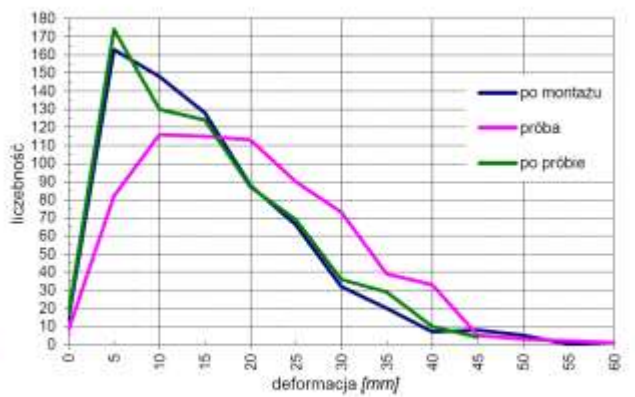
Rys. 8-11. Sumaryczna częstość deformacji



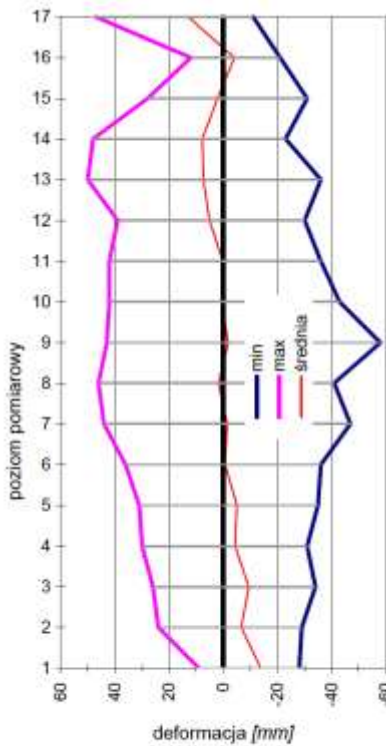
Rys. 8-12. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględne



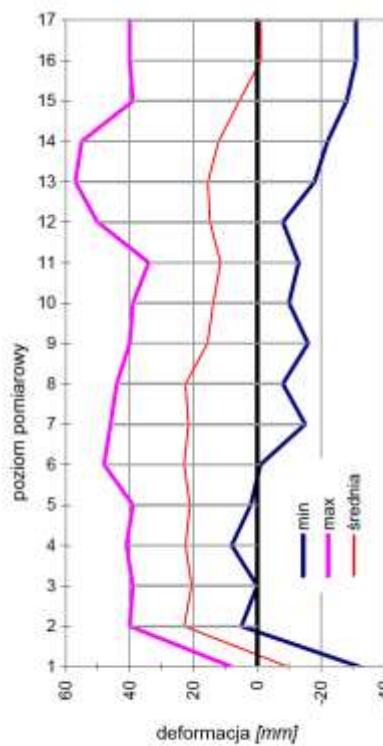
Rys. 8-13. Częstość deformacji



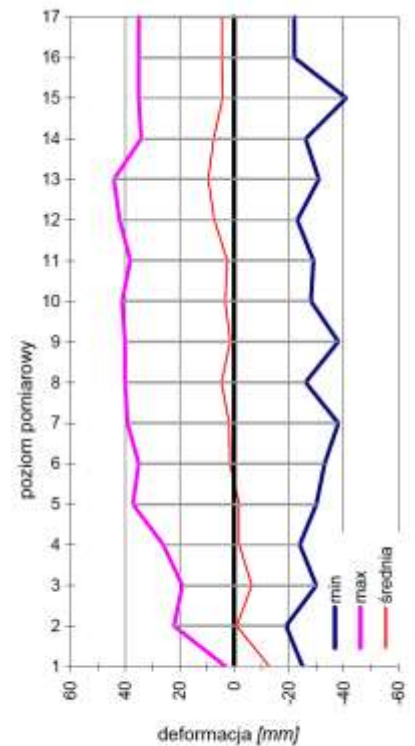
Rys. 8-14. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



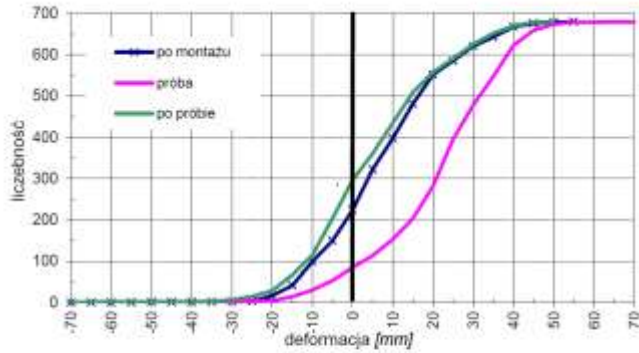
b) podczas próby



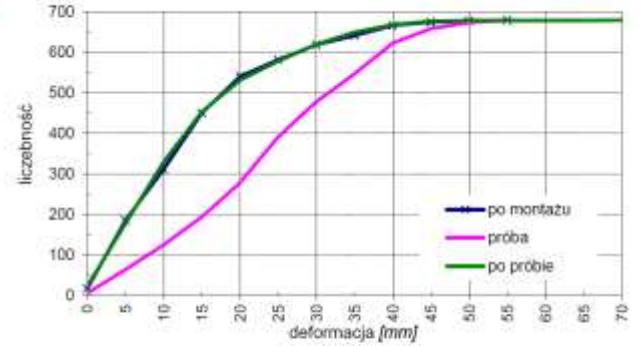
c) po próbie

Rys. 8-15. Obszar zmienności deformacji

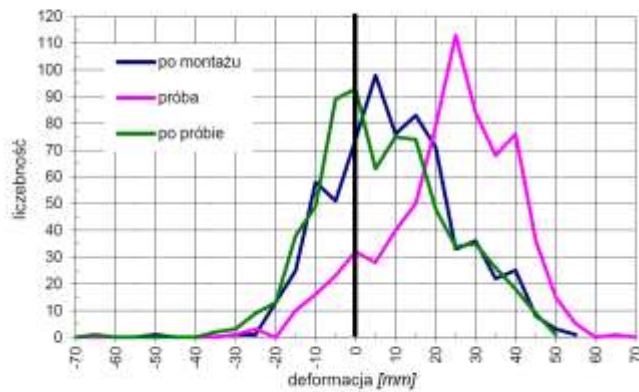
Zbiornik nr 4



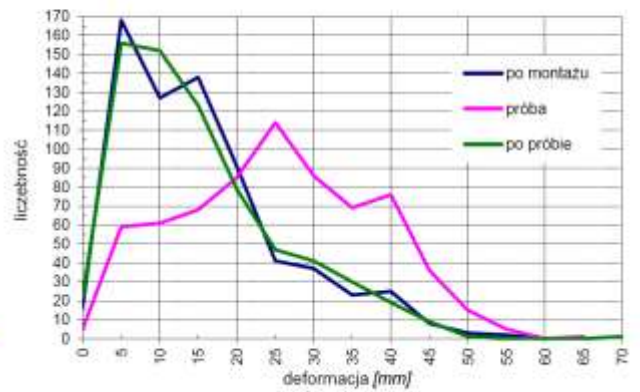
Rys. 8-16. Sumaryczna częstość deformacji



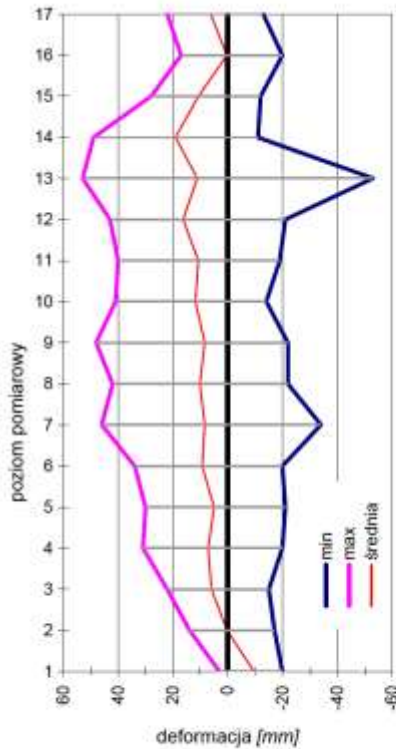
Rys. 8-17. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględne



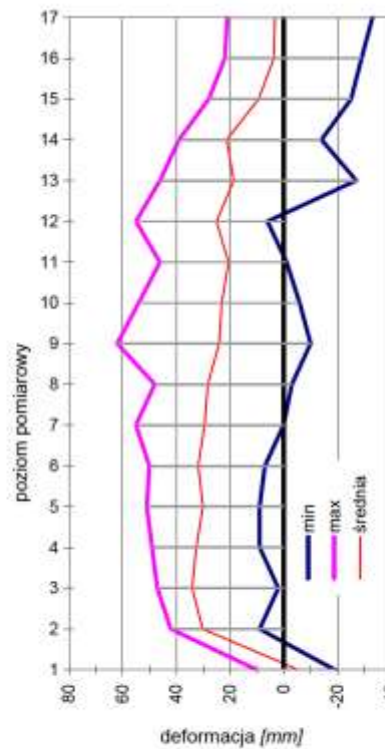
Rys. 8-18. Częstość deformacji



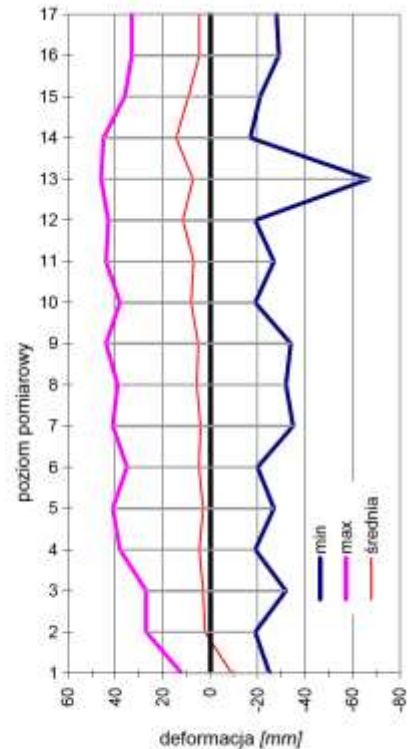
Rys. 8-19. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



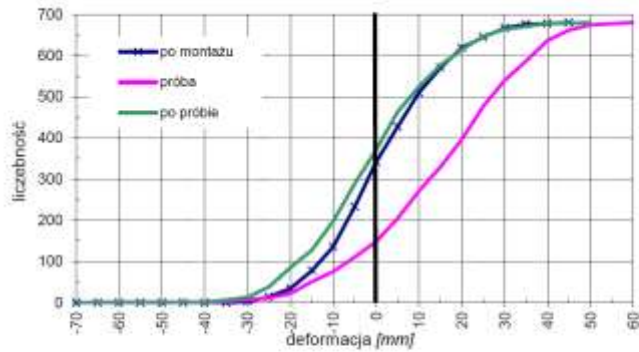
b) podczas próby



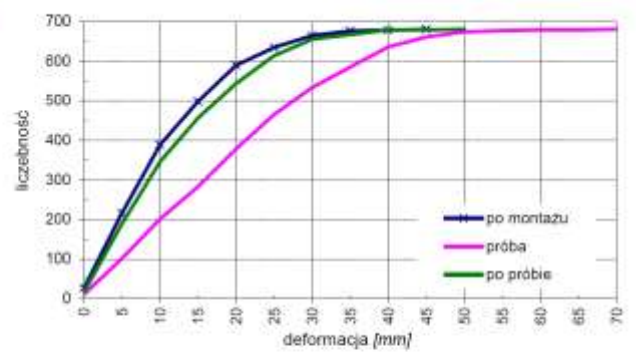
c) po próbie

Rys. 8-20. Obszar zmienności deformacji

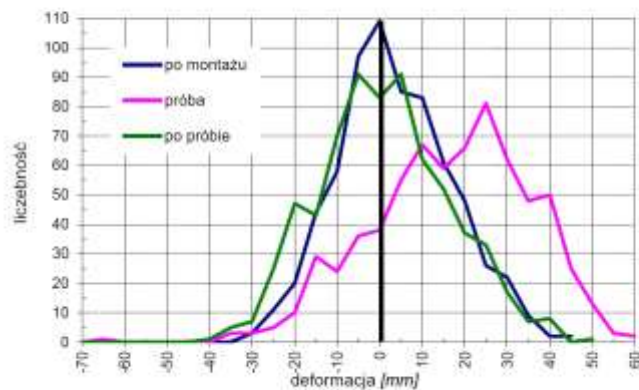
Zbiornik nr 5



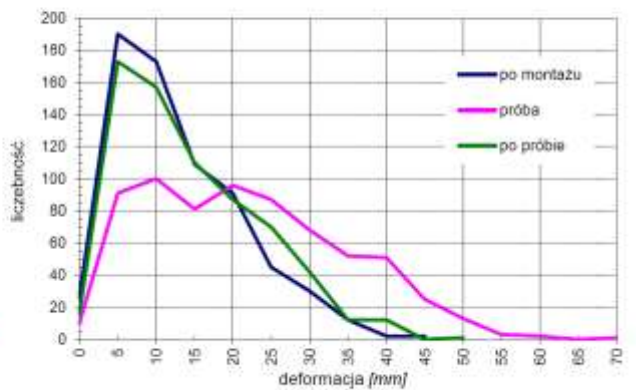
Rys. 8-21. Sumaryczna częstość deformacji



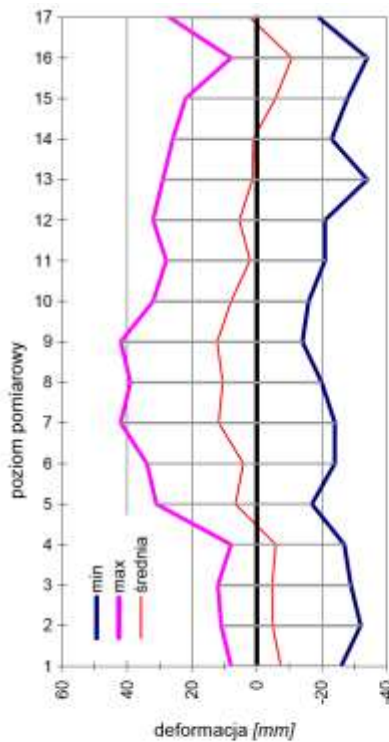
Rys. 8-22. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



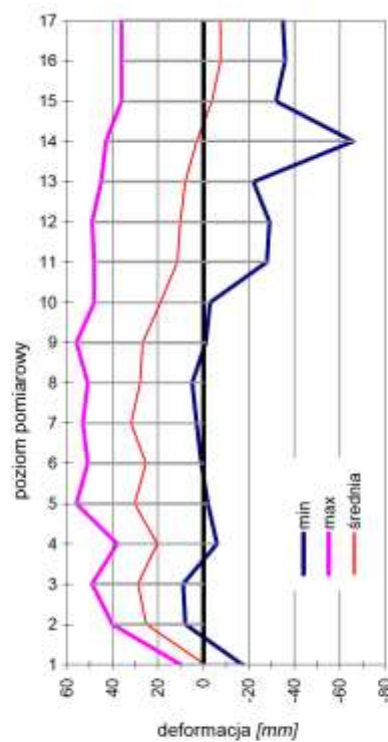
Rys. 8-23. Częstość deformacji



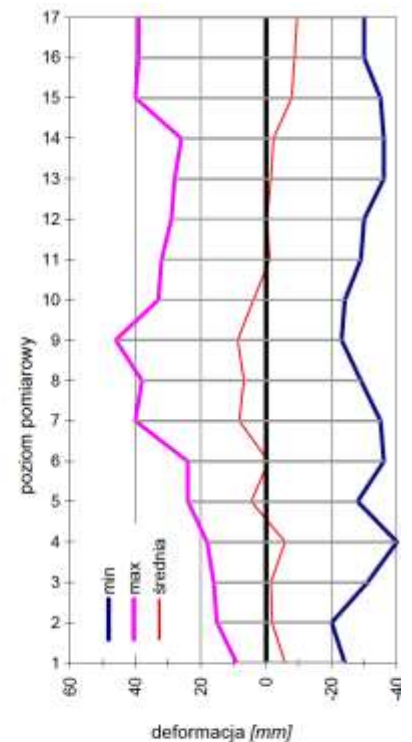
Rys. 8-24. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



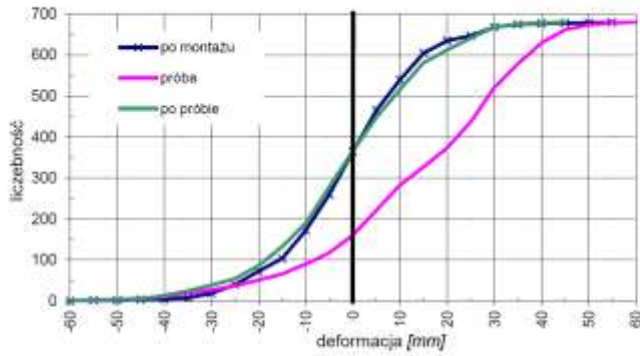
b) podczas próby



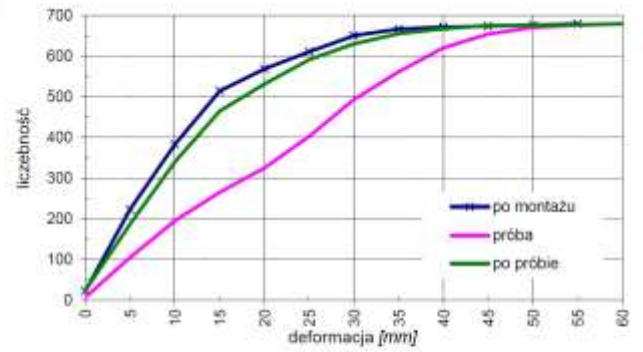
c) po próbie

Rys. 8-25. Obszar zmienności deformacji

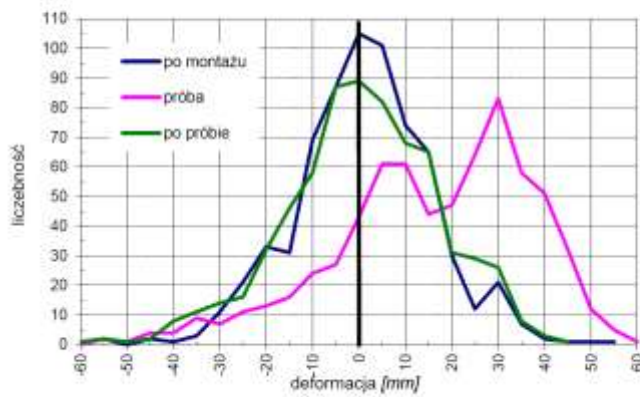
Zbiornik nr 6



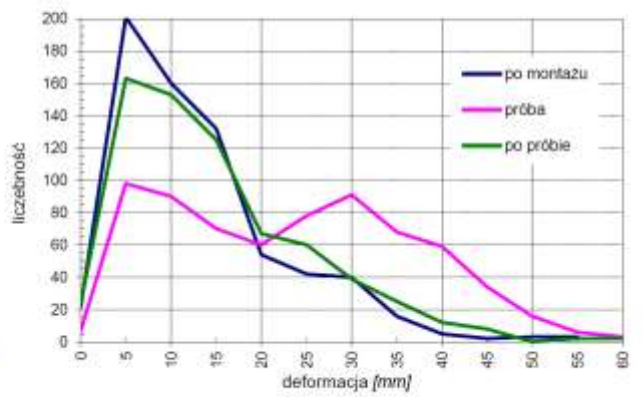
Rys. 8-26. Sumaryczna częstość deformacji



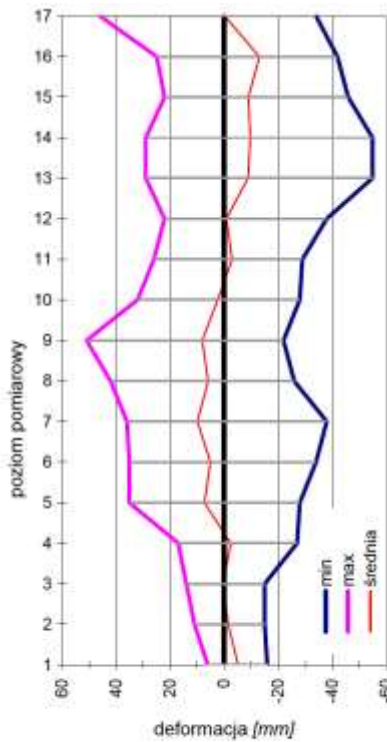
Rys. 8-27. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



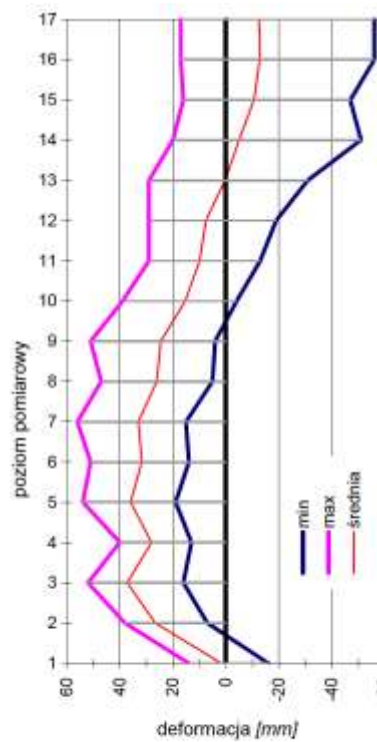
Rys. 8-28. Częstość deformacji



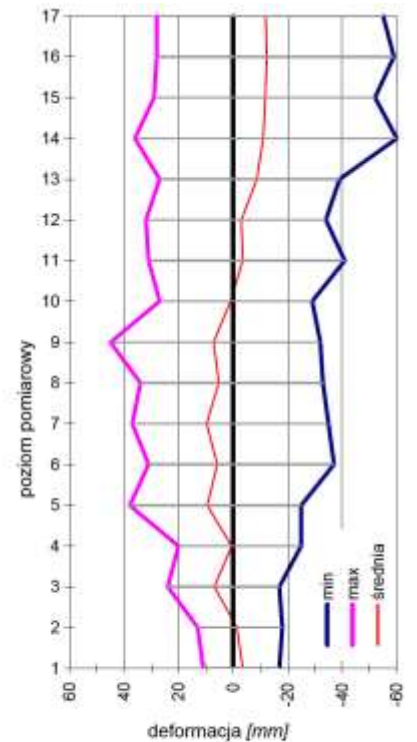
Rys. 8-29. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



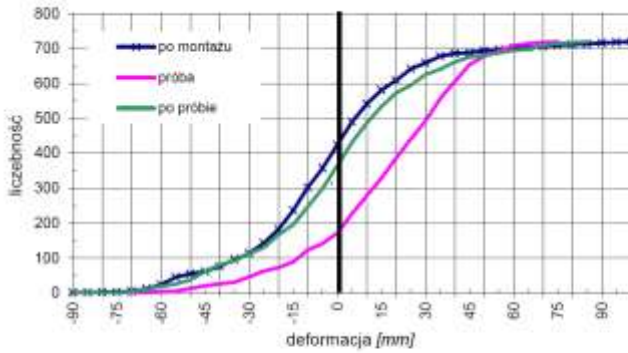
b) podczas próby



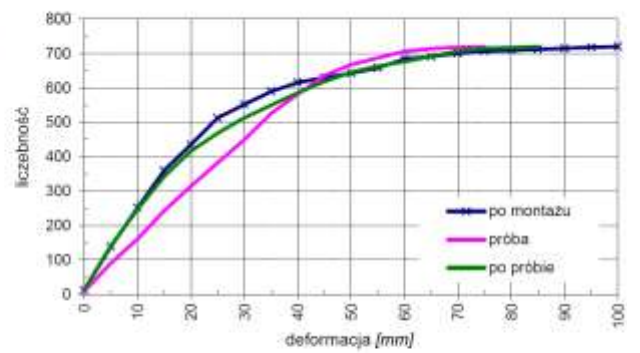
c) po próbie

Rys. 8-30. Obszar zmienności deformacji

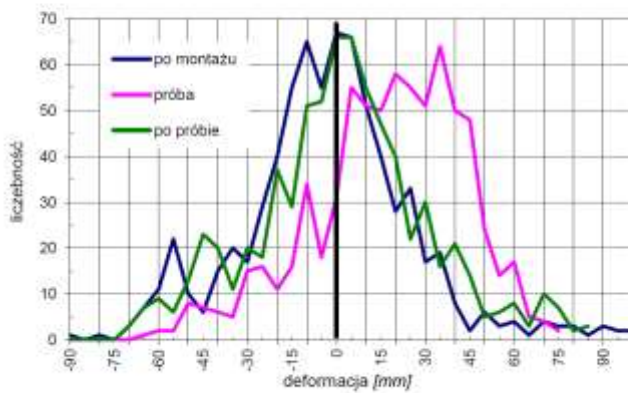
Zbiornik nr 7



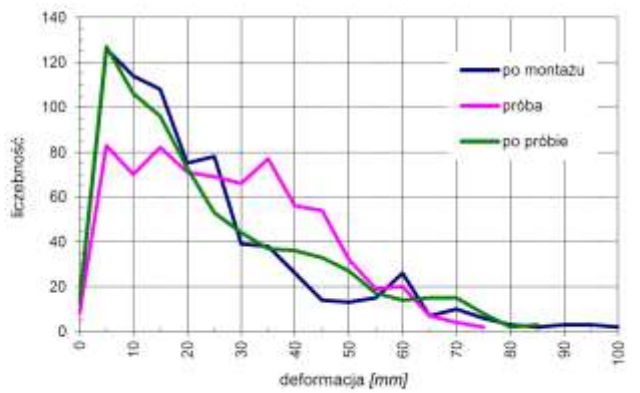
Rys. 8-31. Sumaryczna częstość deformacji



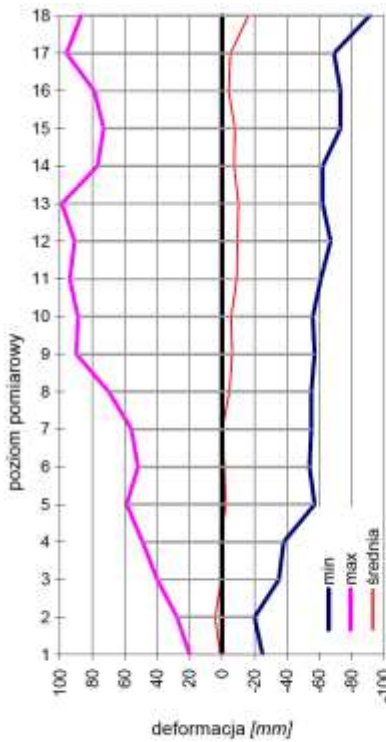
Rys. 8-32. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



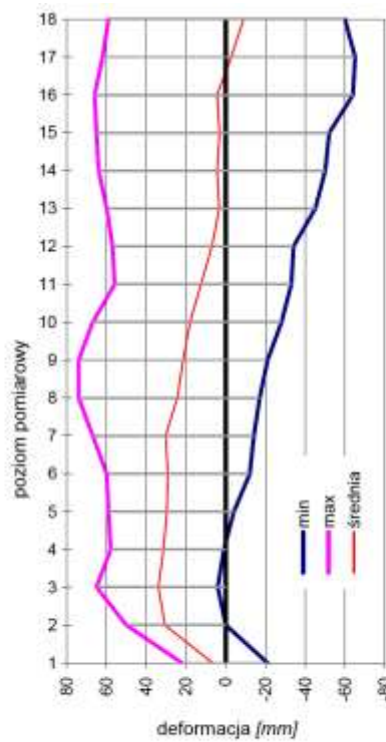
Rys. 8-33. Częstość deformacji



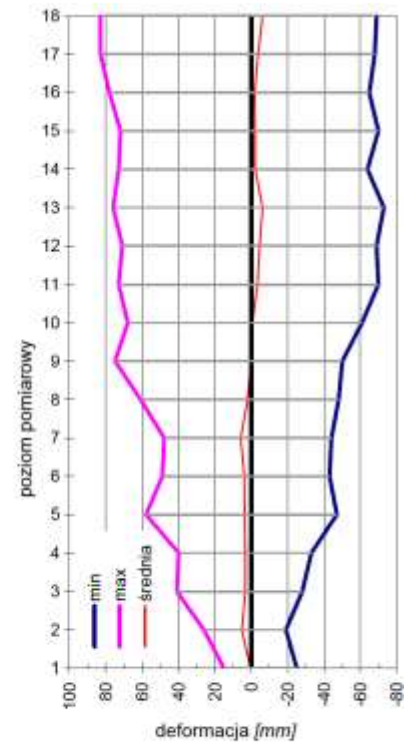
Rys. 8-34. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



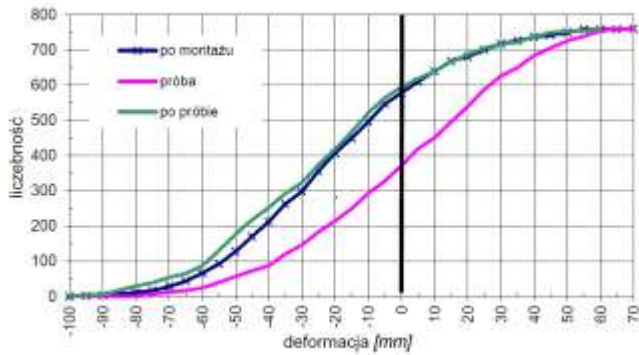
b) podczas próby



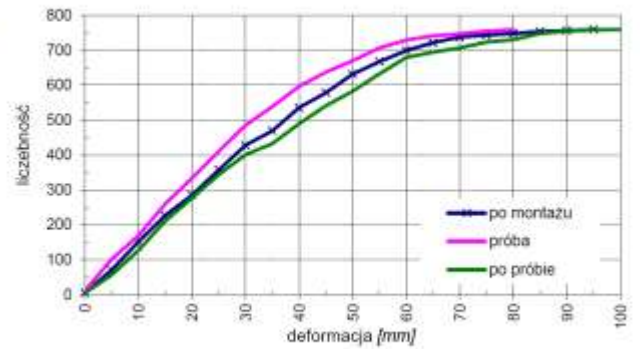
c) po próbie

Rys. 8-35. Obszar zmienności deformacji

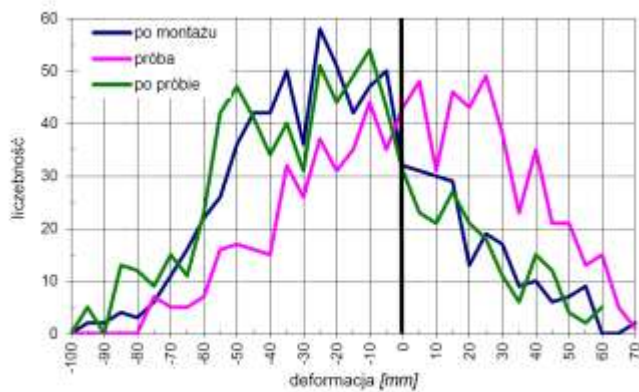
Zbiornik nr 8



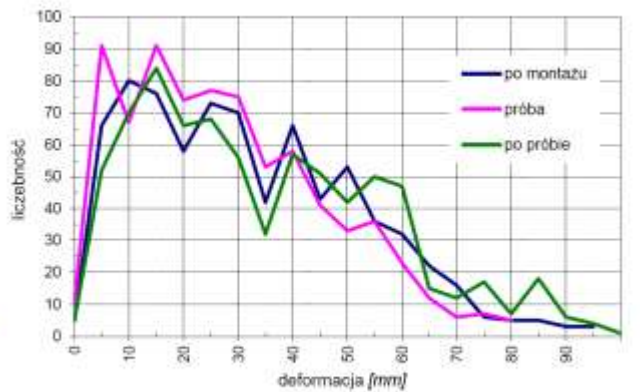
Rys. 8-36. Sumaryczna częstość deformacji



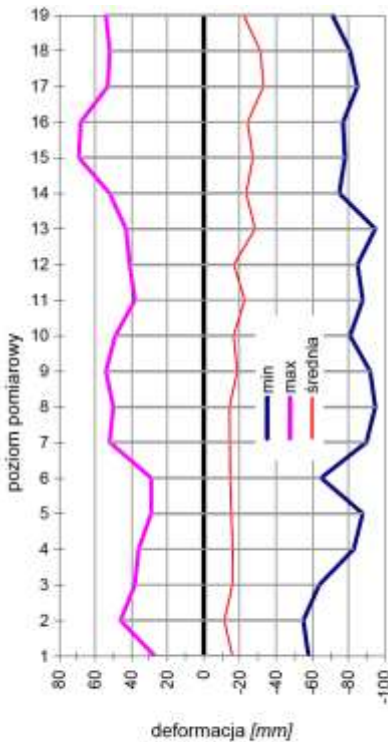
Rys. 8-37. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



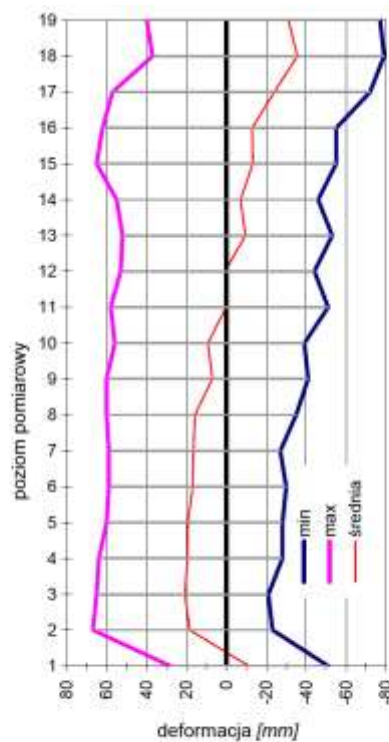
Rys. 8-38. Częstość deformacji



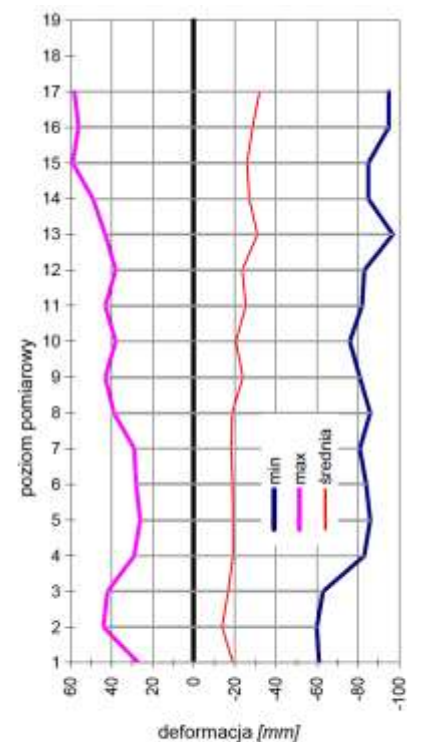
Rys. 8-39. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



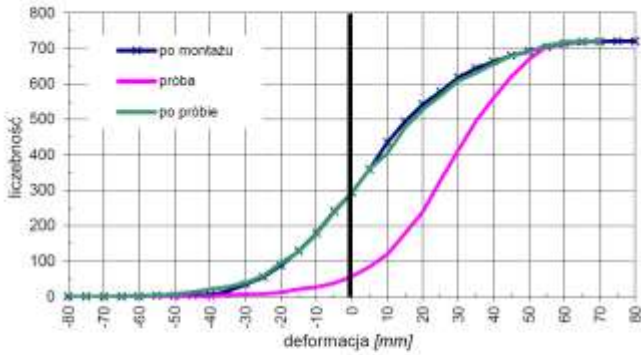
b) podczas próby



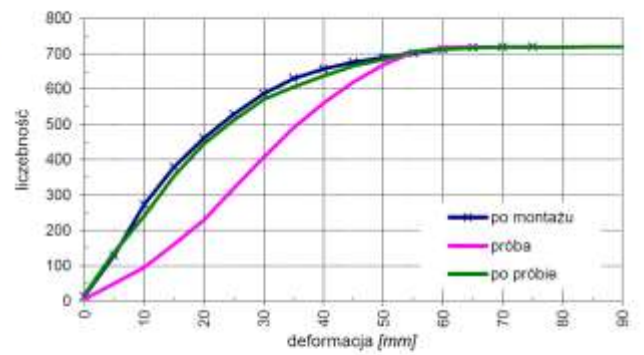
c) po próbie

Rys. 8-40. Obszar zmienności deformacji

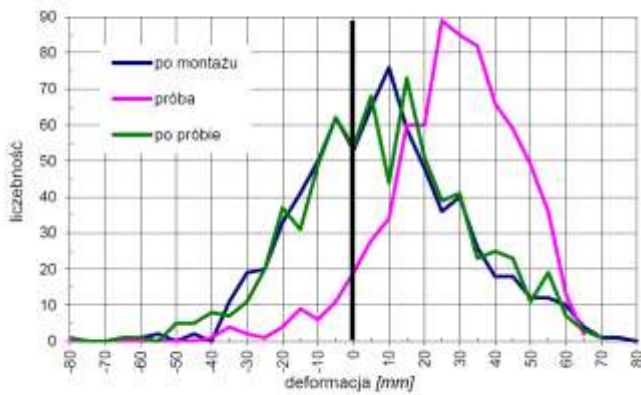
Zbiornik nr 9



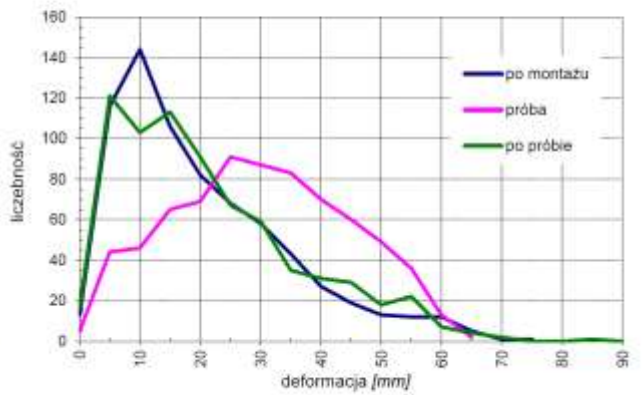
Rys. 8-41. Sumaryczna częstość deformacji



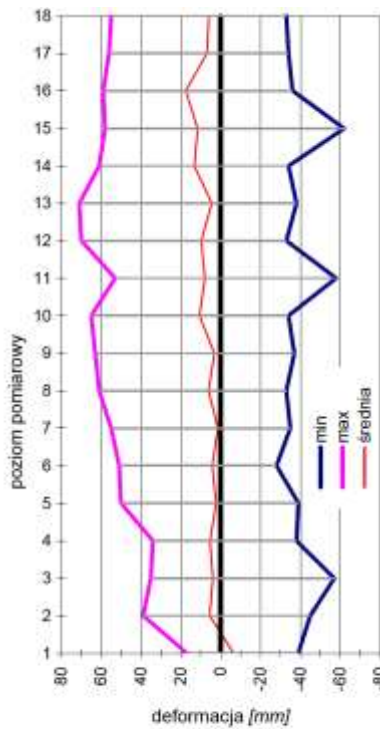
Rys. 8-42. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



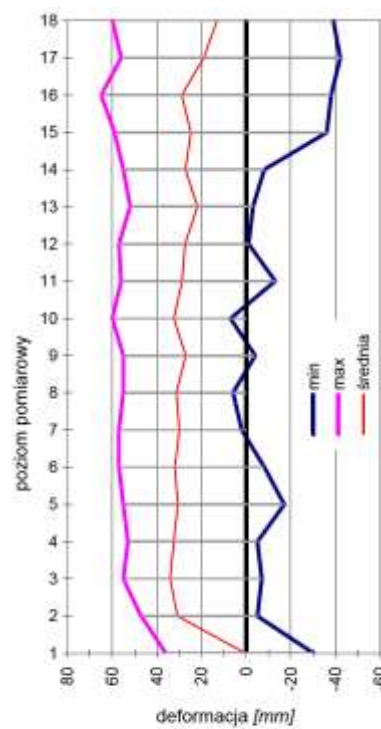
Rys. 8-43. Częstość deformacji



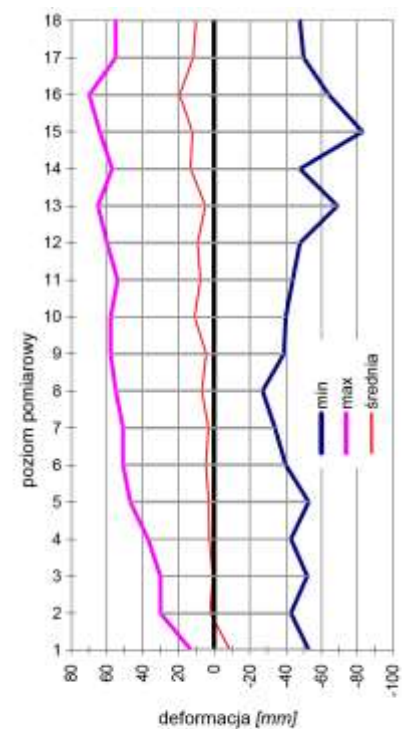
Rys. 8-44. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



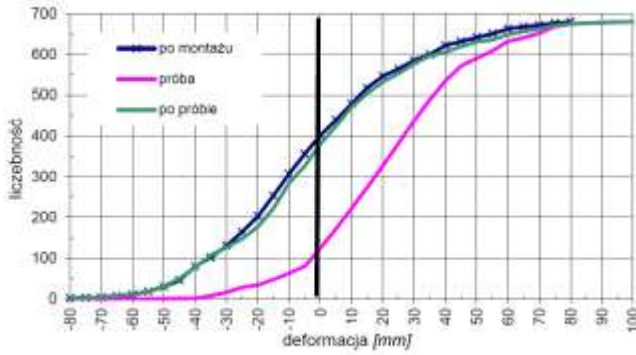
b) podczas próby



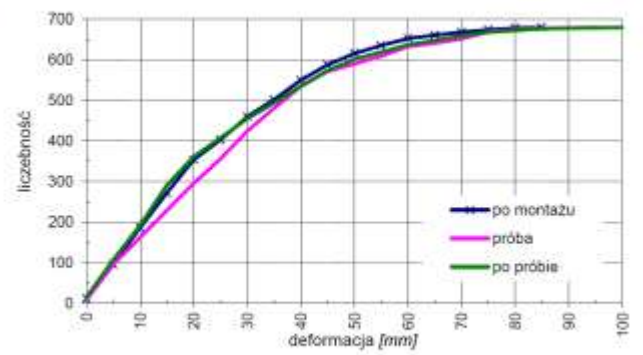
c) po próbie

Rys. 8-45. Obszar zmienności deformacji

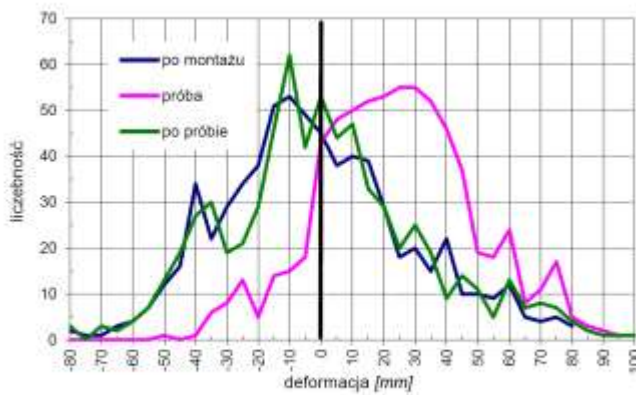
Zbiornik nr 10



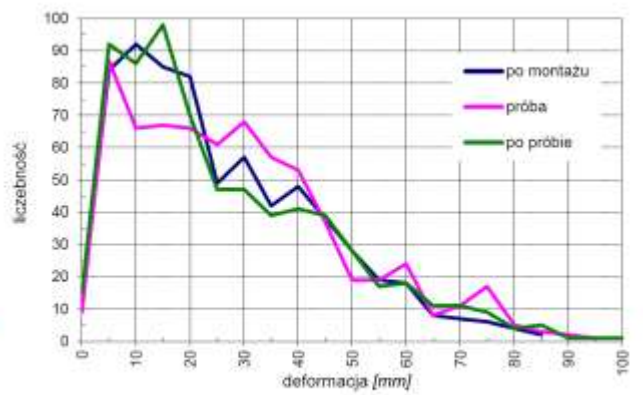
Rys. 8-46. Sumaryczna częstość deformacji



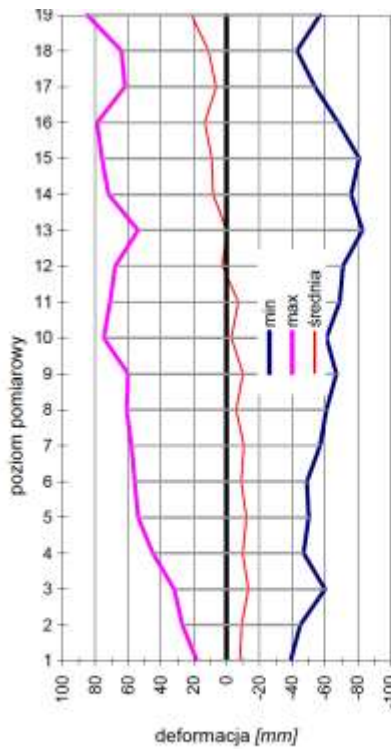
Rys. 8-47. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



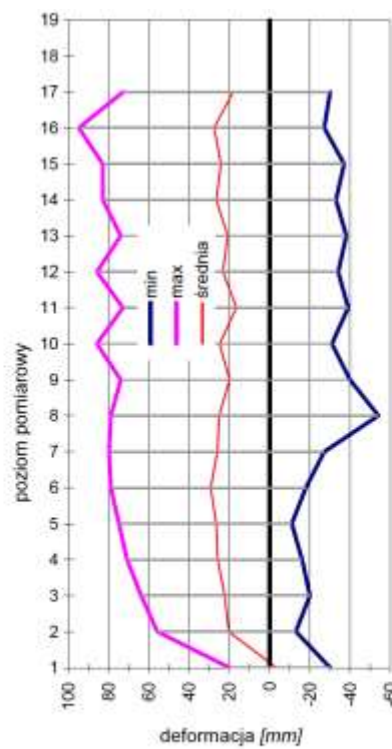
Rys. 8-48. Częstość deformacji



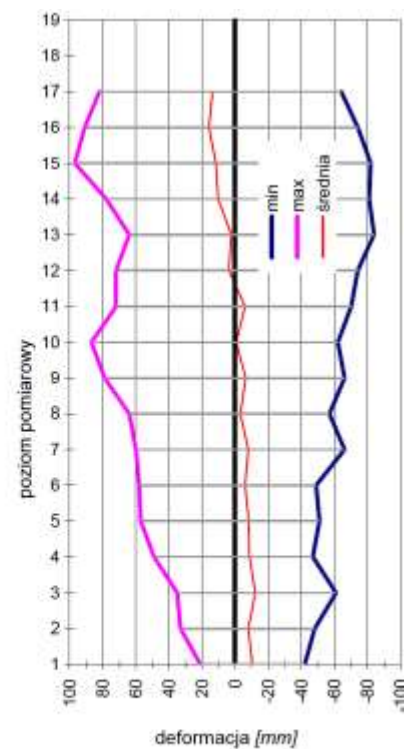
Rys. 8-49. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



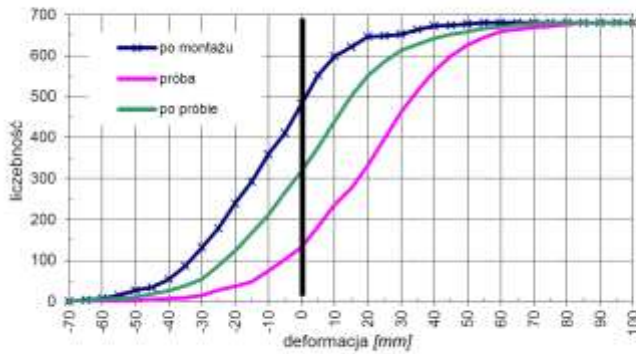
b) podczas próby



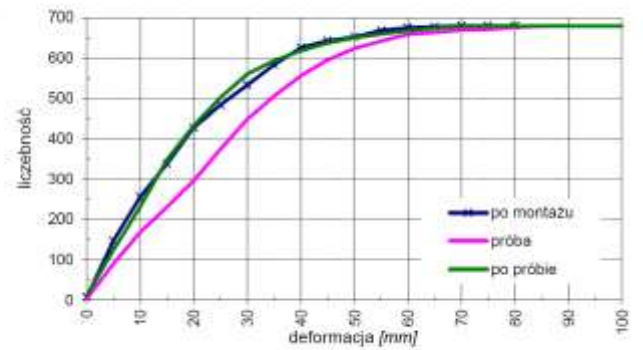
c) po próbie

Rys. 8-50. Obszar zmienności deformacji

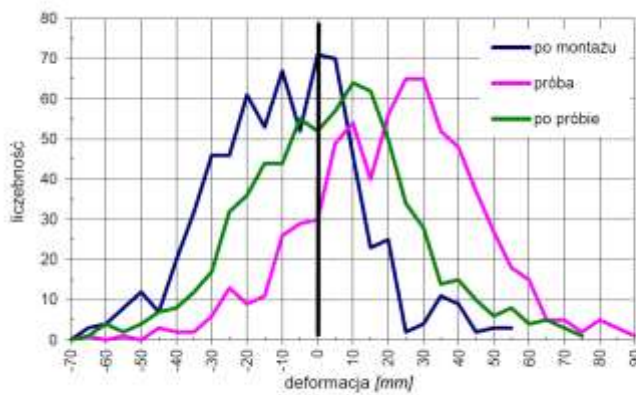
Zbiornik nr 11



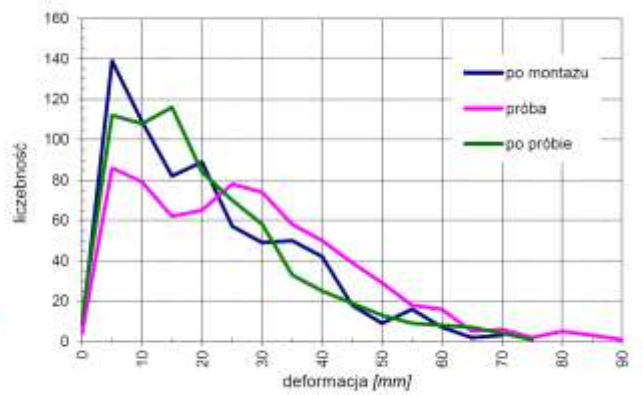
Rys. 8-51. Sumaryczna częstość deformacji



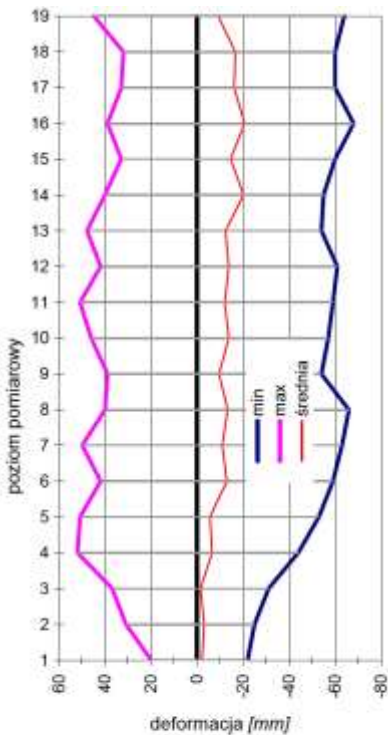
Rys. 8-52. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



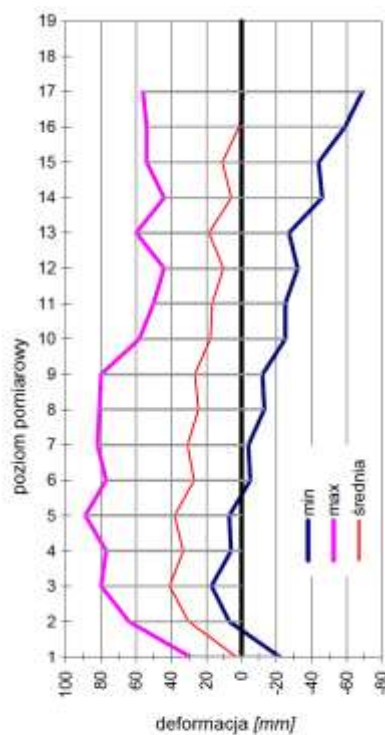
Rys. 8-53. Częstość deformacji



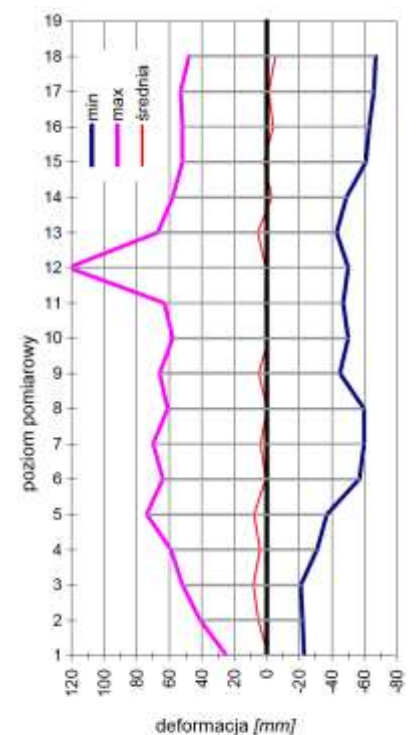
Rys. 8-54. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



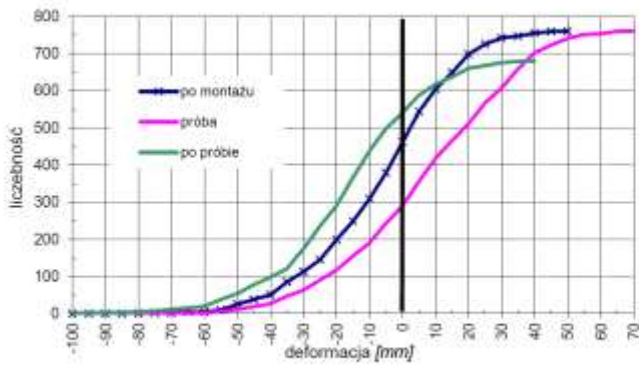
b) podczas próby



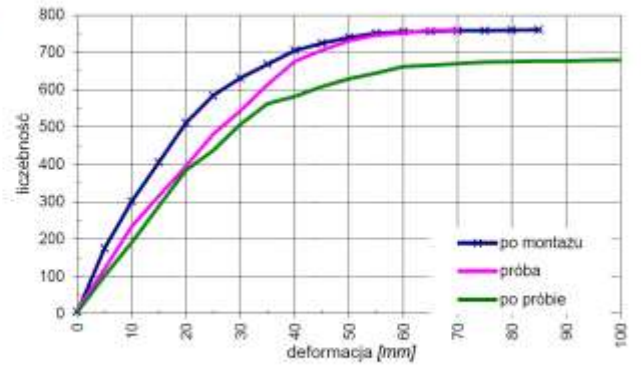
c) po próbie

Rys. 8-55. Obszar zmienności deformacji

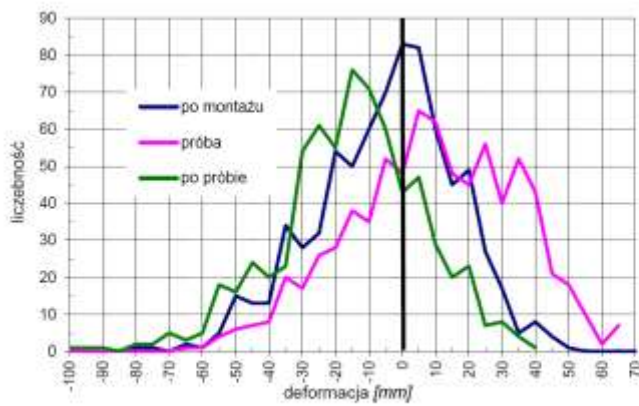
Zbiornik nr 12



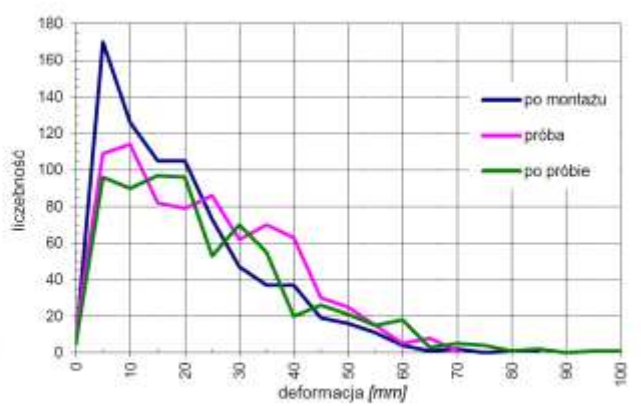
Rys. 8-56. Sumaryczna częstość deformacji



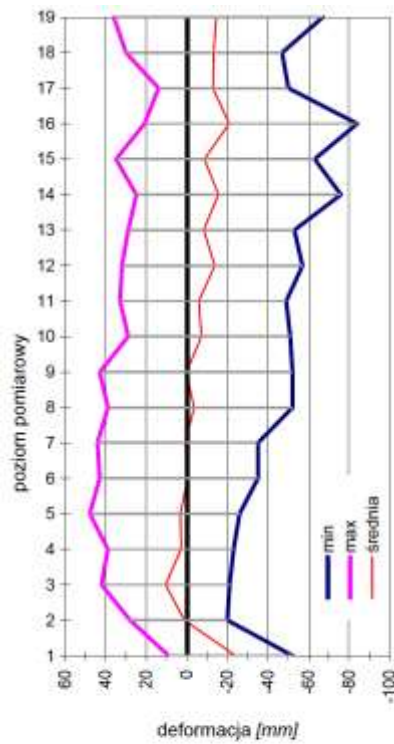
Rys. 8-57. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



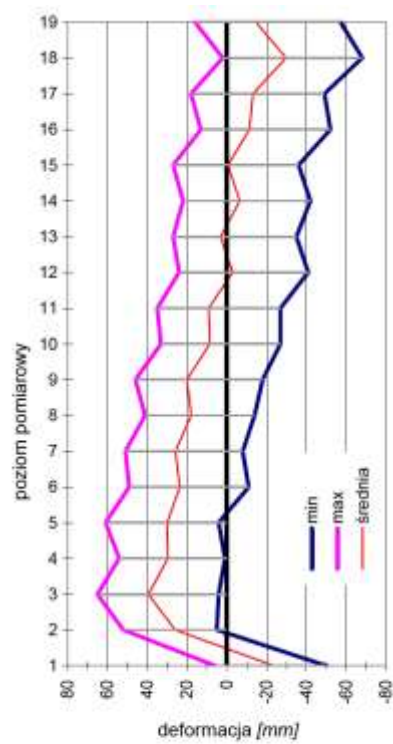
Rys. 8-58. Częstość deformacji



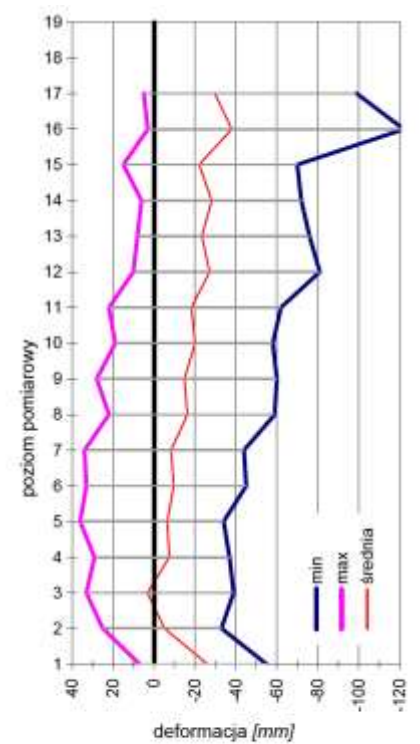
Rys. 8-59. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



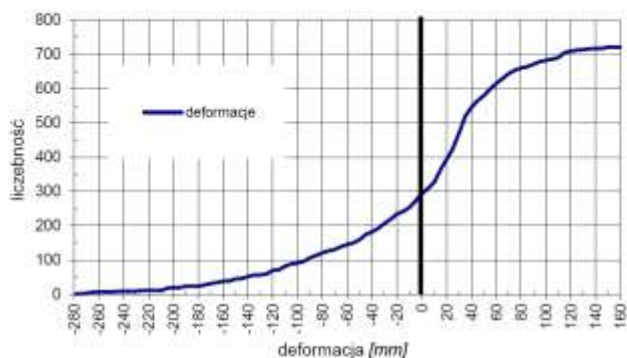
b) podczas próby



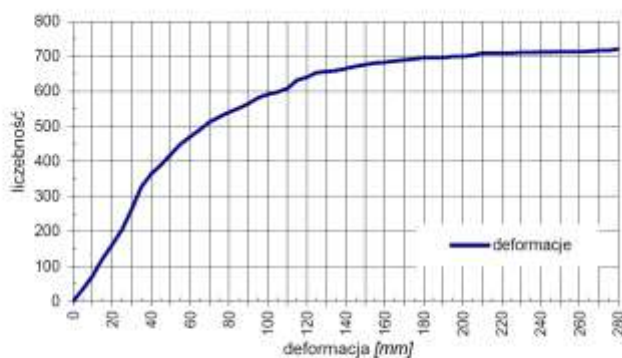
c) po próbie

Rys. 8-60. Obszar zmienności deformacji

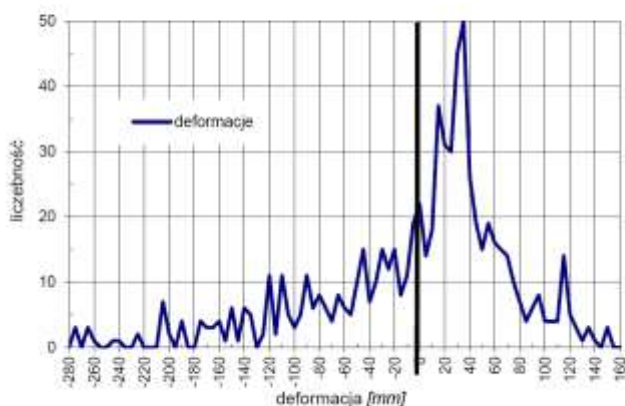
Zbiornik nr 13



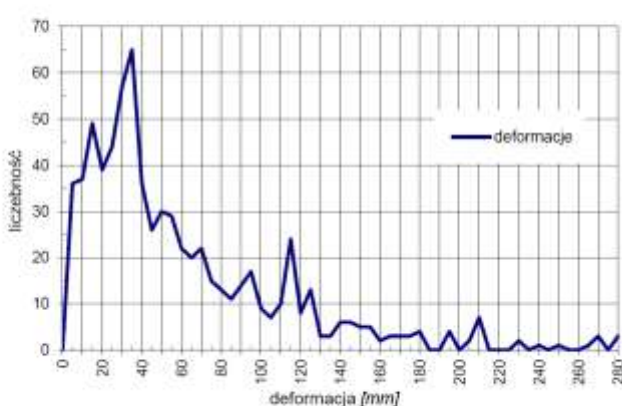
Rys. 8-61. Sumaryczna częstość deformacji



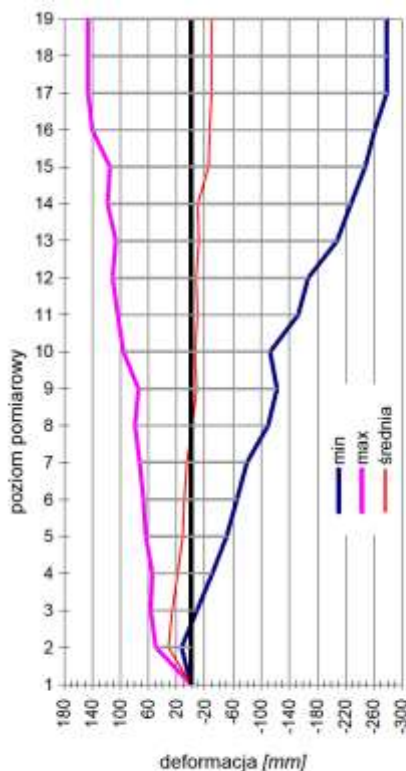
Rys. 8-62. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



Rys. 8-63. Częstość deformacji

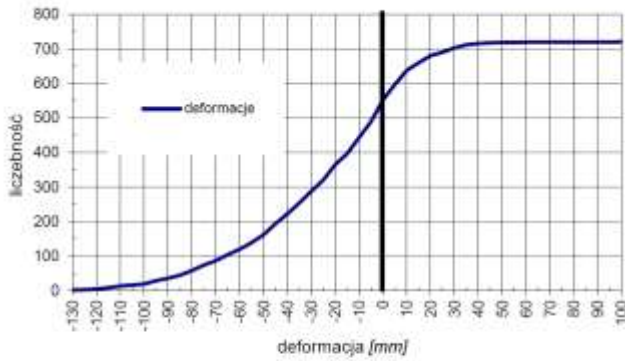


Rys. 8-64. Częstość deformacji bezwzględnej

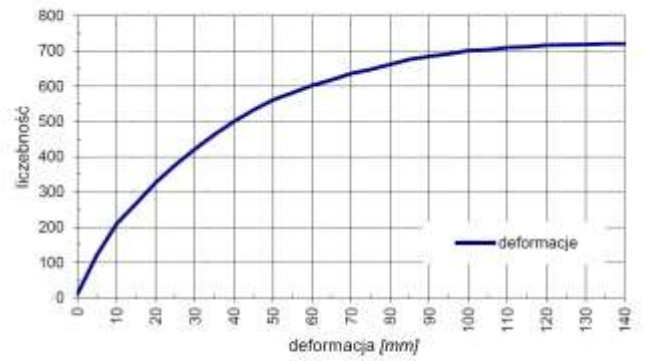


Rys. 8-65. Obszar zmienności deformacji

Zbiornik nr 14



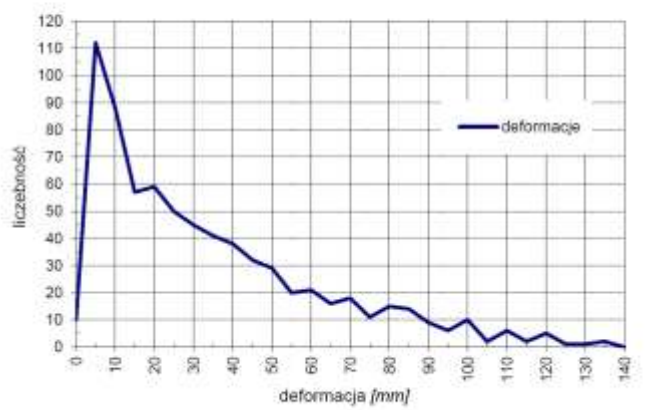
Rys. 8-66. Sumaryczna częstość deformacji



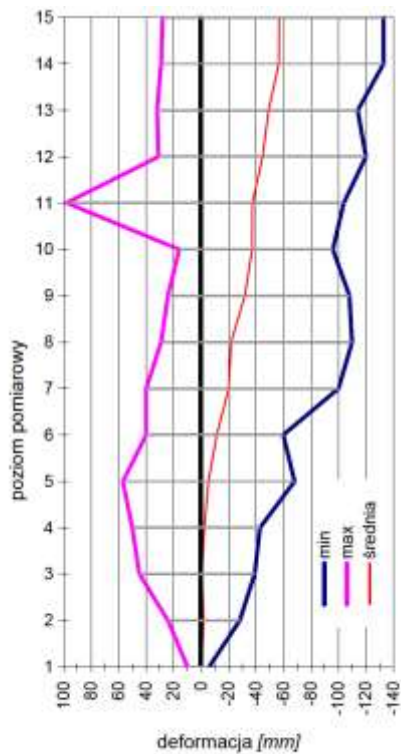
Rys. 8-67. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



Rys. 8-68. Częstość deformacji

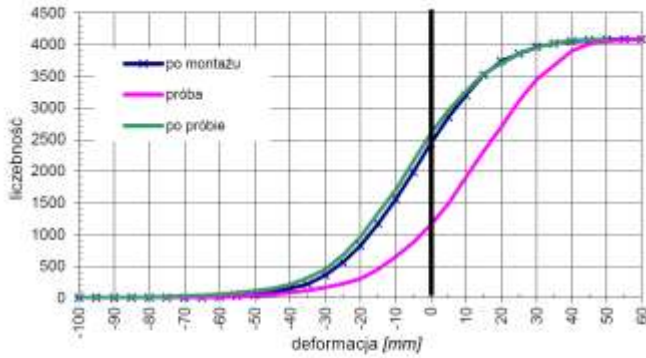


Rys. 8-69. Częstość deformacji bezwzględnej

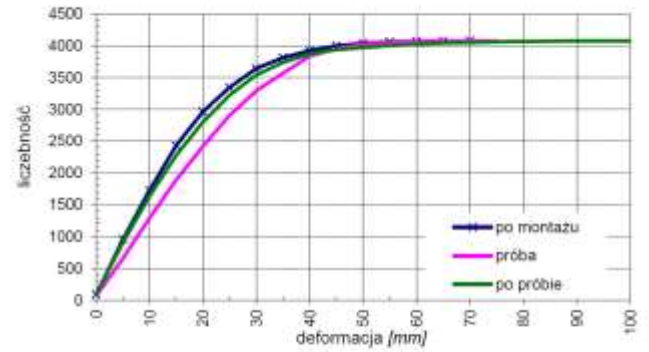


Rys. 8-70. Obszar zmienności deformacji

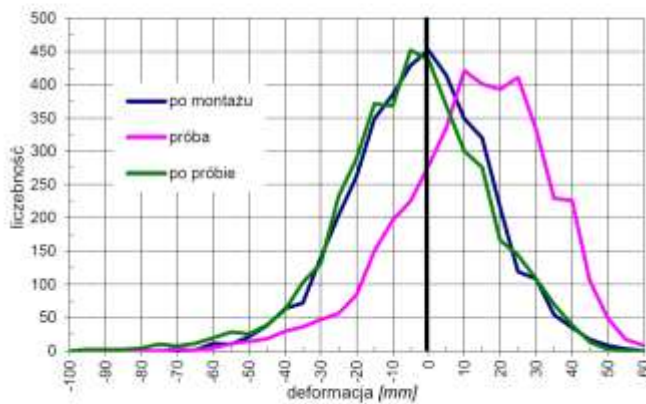
Zbiornik nr 1-6



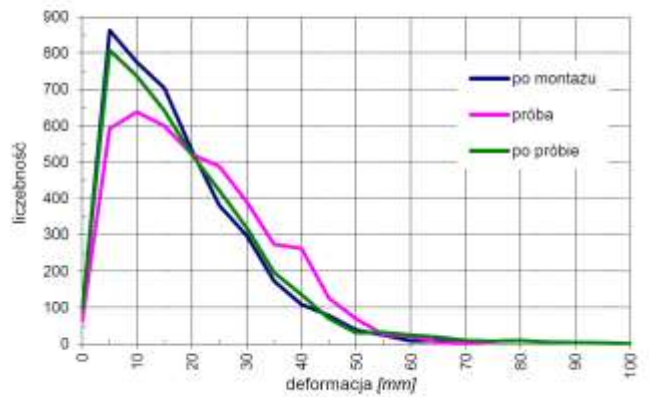
Rys. 8-71. Sumaryczna częstość deformacji



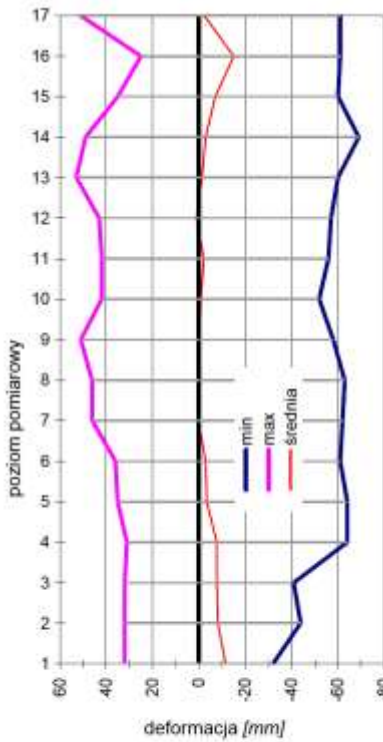
Rys. 8-72. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



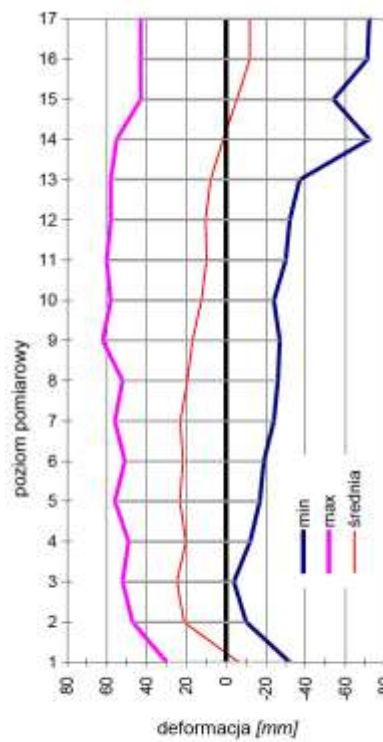
Rys. 8-73. Częstość deformacji



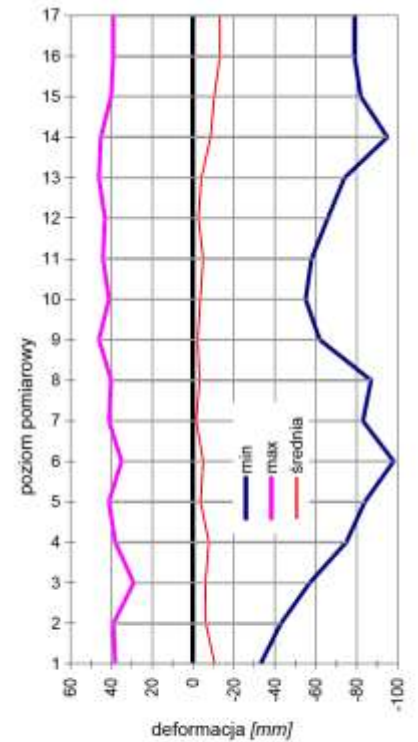
Rys. 8-74. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



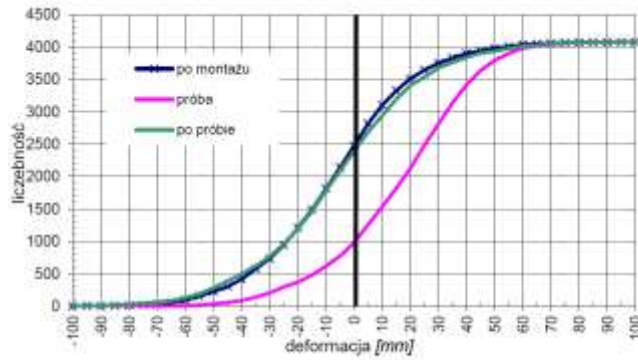
b) podczas próby



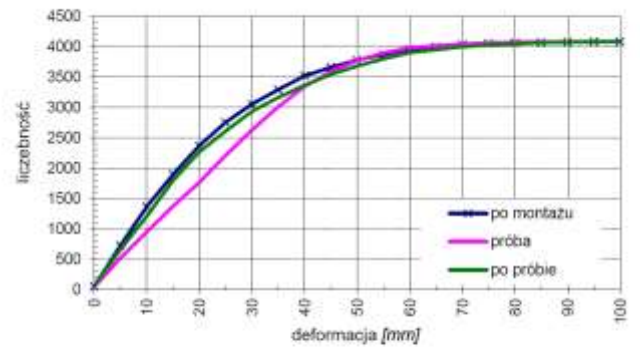
c) po próbie

Rys. 8-75. Obszar zmienności deformacji

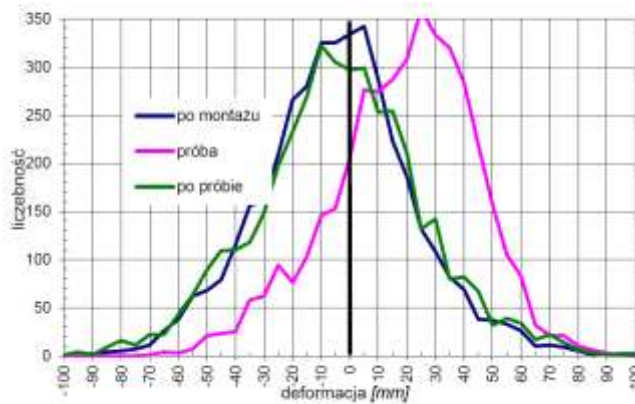
Zbiornik nr 7-12



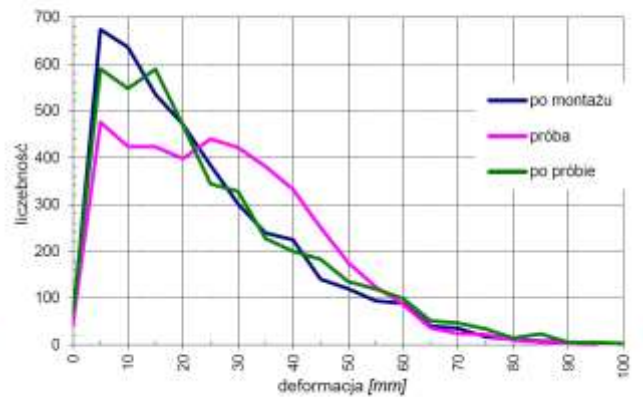
Rys. 8-76. Sumaryczna częstość deformacji



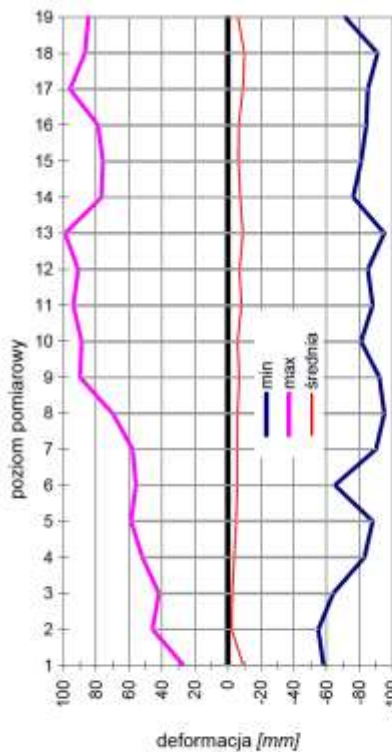
Rys. 8-77. Sumaryczna częstość deformacji bezwzględnej



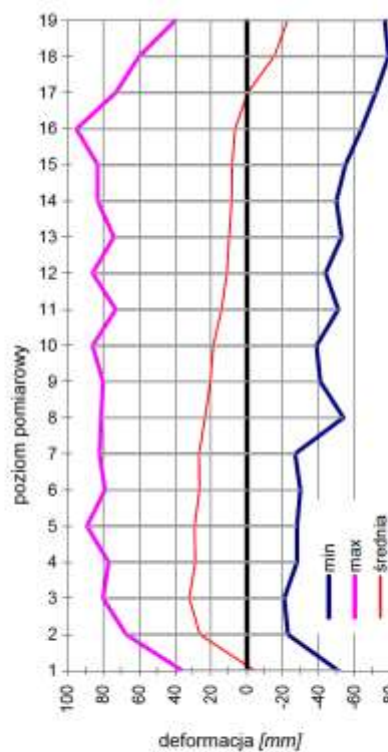
Rys. 8-78. Częstość deformacji



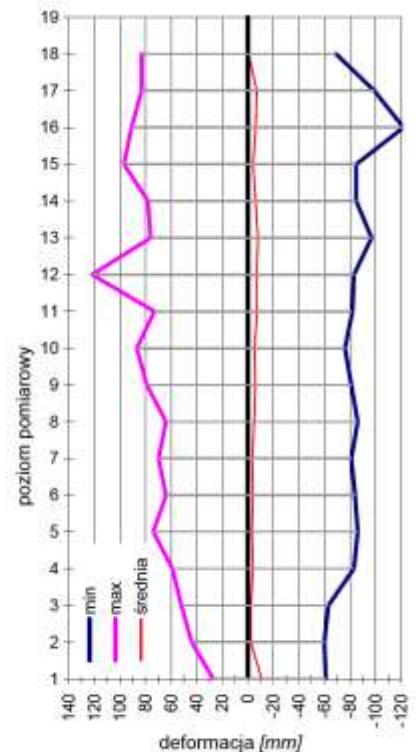
Rys. 8-79. Częstość deformacji bezwzględnej



a) po montażu



b) podczas próby



c) po próbie

Rys. 8-80. Obszar zmienności deformacji

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 65
--	--	----------------------------

8.4. Wnioski z analizy statystycznej

Ocena opracowań analitycznych, zawartych w załączniku numer 3 oraz wcześniej podanych graficznych badanej zbiorowości pozwala w pierwszej kolejności dokonać stwierdzenia, że mamy do czynienia ze zbiorem obiektów o różnych wadach kształtu i różnym ich natężeniu. Należy jednocześnie pamiętać, że przetwarzane tu informacje mają charakter dyskretny. Informują o geometrycznym stanie walcowej powłoki płaszcza i jej zmianach w określonym punkcie pomiarowym, nie niosąc żadnej informacji o zachowaniu się powłoki pomiędzy punktami pomiarowymi.

8.4.1. Wnioski z analizy graficznej

Analiza wykresów sumarycznej częstości deformacji tak względnej jak i bezwzględnej, pozwala wysnuć wniosek, że rozkład deformacji pomierzony po wykonaniu próby wodnej – czyli po jednokrotnym pełnym obciążeniu konstrukcji, jest w wielu przypadkach, prawie identyczny z rozkładem deformacji uzyskanym na podstawie pomiarów konstrukcji nowopowstałej bezpośrednio po zakończeniu prac montażowych. Przemawia za tym fakt wzajemnego nakładania się na siebie linii obrazujących poszczególne rozkłady. Stan taki można stwierdzić na przykładzie obiektów o numerach 1, 3, 4, 6, 7, 9. Powyższy fakt można dla w/w obiektów zaobserwować również na wykresach częstości deformacji. Na wykresach tych można jednak stwierdzić, że występuje pewne zróżnicowanie krzywych. Widoczne są tu różnice w liczbie deformacji w określonych przedziałach. Zmiany te związane są na pewno z dokładnością wykonania pomiarów jak i ze zmianą krzywizny stalowej powłoki po jednym cyklu obciążenia, kiedy to dochodzi do odkształceń pod wpływem naporu cieczy oraz „układania” się konstrukcji pod obciążeniem. Różnice te nie są jednak duże, ale pozwalają stwierdzić fakt, że następuje wyraźna w wielu miejscach zmiana obszaru zmienności badanej cechy.

W niektórych przypadkach, na podstawie rozkładów częstości deformacji można stwierdzić ogólną tendencję imperfekcji całego zbiornika. Ma to szczególnie miejsce w przypadku zbiorników o numerach: 1 (rys. 8-3), 2 (rys. 8-8), 8 (rys. 8-38) - dla odchyłek kształtu skierowanych do wnętrza zbiornika, oraz zbiornika numer: 9 (rys. 8-43) – dla odchyłek skierowanych na zewnątrz. W przypadku pozostałych obiektów można zaobserwować, że występuje centralna tendencja w rozkładzie deformacji zbiorowości, co powoduje, że mamy do czynienia z rozkładami „quasi” normalnymi – na przykład zbiorniki numer: 3 (rys. 8-13), 5 (rys. 8-23), 6 (rys. 8-28), 7 (rys. 8-33).

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 66
--	--	----------------------------

Rozkład częstości deformacji dla konstrukcji obciążonej wykazuje w większości przypadków przesunięcie krzywej przedstawiającej sumaryczną częstość w prawą stronę, czyli następuje wyraźny wzrost wartości deformacji będącego sumą dwóch efektów geometrycznych, a mianowicie: wstępnej deformacji powłoki oraz odkształcenia jej pod wpływem działającego obciążenia hydrostatycznego.

Analiza porównawcza kolejnej grupy wykresów – związanych z przedstawieniem obszarów zmienności imperfekcji dla konstrukcji w trzech stadiach pomiarowych – pozwala na stwierdzenie faktu wzrostu ekstremalnych wartości deformacji konstrukcji.

Z analizy wykresów obszarów zmienności dla obiektów nieobciążonych – dla pomiarów „po montażu” i „po próbie” - można w wielu przypadkach zaobserwować wzrost ekstremalnych wartości deformacji po cyklu obciążenia. Jest to szczególnie widoczne w przypadku zbiorników o numerach: 1, 2, 5, 10, 11, 12. Fakt wzrostu wartości ekstremalnych dotyczy zarówno wartości dodatnich deformacji jak i ujemnych. Szczegółowo wzrost ten można przeanalizować w części analitycznej niniejszej analizy.

Na wykresach obrazujących zachowanie się kształtu powłoki w czasie obciążenia konstrukcji wyraźnie widoczne jest zachowanie się konstrukcji pod obciążeniem hydrostatycznym, które powoduje w zasadniczej części zmniejszenie wartości deformacji i odpowiedni wzrost odkształceń dodatnich. Zmianę charakteru deformacji można zobaczyć na wykresach dla zbiorników o numerach: 1, 6, 7, 8, 11, 12.

Przedstawiona na wykresach obszaru zmienności wartość średniej arytmetycznej obrazuje ogólny stan deformacji zbiornika. Podobnie jak obszar zmienności tak i średnia ulega w widocznym zakresie zmianom. Zmiany te nie podlegają jakimś logicznym regułom i związane są silnie z zachowaniem się całej konstrukcji. W niektórych przypadkach średnia oddaje ogólny charakter deformacji całego obiektu:

- zbiorniki o numerach: 1, 2, 8 - średnia przyjmuje wartości ujemne na całym zakresie,
- zbiorniki o numerach: 4, 9 – średnia przyjmuje tylko wartości dodatnie.

W niektórych przypadkach wykres średniej arytmetycznej oscyluje wokół osi przedstawiającej idealną powłokę walcową – obiekty o numerach 3, 6, 7, co świadczy o dużym nasileniu określonego typu „małych deformacji” i nieznanym rozrzucie pozostałych.

8.4.2. Wnioski z części analitycznej

Analiza części obliczeniowej w zakresie odchyłek kształtu płaszczy zbiorników potwierdza stwierdzenia postawione na podstawie analizy graficznej dodając jednak dokładny jej opis ilościowy.

Potwierdza się fakt wzrostu wartości w deformacji ekstremalnych, dla konstrukcji nieobciążonych, po wykonaniu próby wodnej co można przedstawić na podstawie poniższej tablicy 8.1. .

Tablica 8.1. Porównanie wartości ekstremalnych oraz obszarów zmienności

Nr zbiornika	Pomiar „po montażu”			Pomiar „po próbie”		
	x_{\min}	x_{\max}	R	x_{\min}	x_{\max}	R
1	-69	25	86	-95	35	118
2	-64	51	99	-98	39	112
4	-53	53	106	-67	46	113
9	-62	71	120	-83	70	147
11	-68	52	113	-67	122	172
12	-84	48	105	-122	36	125

W przypadku niektórych zbiorników różnice pomiędzy wartościami są małe, lecz przedział obszaru zmienności na określonym poziomie niejednokrotnie znacznie wzrasta. Zostało to przedstawione w tablicy 8.2. .

Tablica 8.2. Porównanie wartości ekstremalnych oraz obszarów zmienności

Nr zbiornika	Pomiar „po montażu”			Pomiar „po próbie”		
	x_{\min}	x_{\max}	R	x_{\min}	x_{\max}	R
10	-83	85	157	-84	97	179

Występują również przypadki ograniczenia obszaru zmienności - tablica 8.3. .

Tablica 8.3. Porównanie wartości ekstremalnych oraz obszarów zmienności

Nr zbiornika	Pomiar „po montażu”			Pomiar „po próbie”		
	x_{\min}	x_{\max}	R	x_{\min}	x_{\max}	R
3	-58	50	101	-41	44	78

Dla zbiorników o numerach 1 ÷ 12 obszar zmienności deformacji mieści się w granicach pomiędzy -42 ÷ 178 mm .

Analiza średniej arytmetycznej wartości deformacji dla stanu „po montażu” i „po próbie” pozwala na określenie ogólnej charakterystyki zachowania się konstrukcji. Wartości średnie na poszczególnych poziomach pomiarowych również ulegają zmianom. Zmiany wartości średnich arytmetycznych można przeanalizować na podstawie zamieszonej tu tablicy 8.4. .

Tablica 8.4. Porównanie średnich arytmetycznych

Nr zbiornika	Średnia arytmetyczna pomiarów			
	Globalna dla obiektu		Wartości dla poziomów pomiarowych	
	„po montażu”	„po próbie”	„po montażu”	„po próbie”
1	-23	-25	-30	-45
2	-11	-18	-18	-26
3	-1	2	13	4
4	8	5	19	14
5	2	-1	2	-9
6	-1	-1	0	-12
7	-5	0	-16	-6
8	-20	-22	-33	-32
9	6	7	-6	-9
10	-1	-1	16	14
11	-11	2	-21	-4
12	-7	-18	-13	-38

Analiza wartości kwantyli przedstawionych zbiorczo w tablicy 8.5 ta pozwala określić z jakim typem zbiorowości mamy do czynienia i jaki jest jej rozkład.

Tablica 8.5. Zestawienie wartości kwantyli – globalnych dla obiektów

Nr zbiornika	Pomiar „po montażu”			Pomiar „po próbie”		
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₁	Q ₂	Q ₃
1	-31	-23	-14	-35	-23	-14
2	-23	-13	2	-29	-18	-5
3	-12	-1	10	-10	0	13
4	-3	7	18	-6	4	16
5	-8	0	10	-11	-1	9
6	-10	-1	8	-11	-1	10
7	-20	-4	10	-17	0	16
8	-41	-22	-1	-46	-22	-3
9	-9	6	20	-9	6	22
10	-22	-5	18	-21	-3	16
11	-25	-11	3	-15	2	16
12	-20	-4	8	-30	-16	-3

Można to przykładowo przeanalizować na przykładzie zbiornika numer 1 gdzie:

- Q₁ = -31 oznacza, że 25% wszystkich pomiarów ma wartości mniejsze od „-31”,
- Q₂ = -23 informuje, że 50% wszystkich pomiarów ma wartości mniejsze od „-23”, a 50% wartości większe,
- Q₃ = -14 informuje, że 75% wszystkich pomiarów ma wartości mniejsze od „-14”, a 25% wartości większe od podanej granicy.

Na podstawie powyższych informacji można ocenić rodzaj rozkładu. Powyższe zestawienie niesie ze sobą informację o wartościach badanej zbiorowości odchyłek.

W przypadku zbiorników o numerach: 3, 5, 6 - widoczna jest symetria rozkładu deformacji wokół wartości oczekiwanej jaką jest deformacja o wartości „0”.

Tablica 8.6. Przykładowe wartości kwantyli dla poziomów pomiarowych

Nr zbiornika	Pomiar „po montażu”			Pomiar „po próbie”		
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₁	Q ₂	Q ₃
1	-43	-27	-20	-63	-46	-24
2	-40	-29	-18	-37	-25	-7
3	-20	-17	-9	-19	-13	-8
4	-2	7	28	-6	3	20
	10	18	27	5	13	29
5	-12	-9	1	-22	-9	2
	3	12	22	-2	10	20
6	-22	-15	-7	-22	-15	0
	4	11	18	2	10	24
7	-51	-21	6	-41	-19	24
	-37	-3	16	-37	-6	31
8	-62	-42	-11	-57	-43	-9
9	1	20	33	2	24	37
	-20	-5	5	-18	-7	2
10	-16	12	34	-12	9	34
	-36	-14	9	-22	-10	12
11	-37	-24	-6	-24	-2	-14
	-16	-8	4	-5	3	20
12	-33	-18	-3	-51	-35	-20
	-1	7	20	-11	4	18

Również powyższa tablica 8.6 potwierdza fakt zamiany zakresów deformacji powłoki walcowej płaszczu zbiornika przy porównaniu pomiarów tego samego obiektu na określonych poziomach pomiarowych.

Wykorzystując miary zmienności w postaci różnych odchyłeń, np. odchylenia standardowe,

Tabela 8.7. Porównanie wartości odchyłeń standardowych

Nr zbiornika	Odchylenie standardowe			
	Globalne dla obiektu		Wartości przykładowe dla poziomów pomiarowych	
	„po montażu”	„po próbie”	„po montażu”	„po próbie”
1	15	20	21	29
2	19	18	21	22
3	16	16	20	19
4	15	16	20	23
5	13	15	15	17
6	15	17	17	21
7	29	30	43	42
8	30	31	36	39
9	22	24	26	28
10	31	32	37	38
11	21	24	25	31
12	21	22	23	27

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 70
--	--	----------------------------

można przeanalizować zmianę rozpiętości obszaru deformacji, w stosunku do średniej na poszczególnych poziomach jak i dla całego zbiornika (tab. 8.7).

Na podstawie podanego wcześniej zestawienia wartości odchylenia standardowego można prześledzić zmiany wartości tej charakterystyki. Różnica wartości powyższej cechy dla poszczególnych obiektów wynosi od $0 \div 3$ mm, z przewagą różnic o wartości jednego milimetra. Dla poziomów pomiarowych wartości te są większe i mieszczą się w przedziale $1 \div 8$ mm. Stosunkowo małe różnice wartości odchylenia potwierdzają wcześniejsze wnioski, postawione w trakcie analizy części graficznej a dotyczącej praktycznej niezmienności zasadniczej części odchylek geometrii płaszcza w stanie przed i po obciążeniu. Powyższy fakt wynikał wówczas z pokrywania się krzywych obrazujących rozkłady deformacji.

Ocena sił dyspersji składników zbiorowości wykonana przy wykorzystaniu współczynników V_s i V_d wskazuje na znaczne zróżnicowanie. Świadczą o tym duże wartości tych współczynników wynoszące nierzadko 30..40-to krotność wartości średnich.

8.4.3. Porównanie grup zbiorników

Porównanie grup oznaczonych symbolami „1-6” i „7-12” pozwala na następujące stwierdzenia:

- zbiorniki o numerach „7-12” zostały wykonane z większymi odchylkami – w zakresie $-100 \div 100$ mm, przy wartościach dla grupy zbiorników „1-6” w zakresie $-100 \div 60$ mm,
- w przypadku obiektów grupy „7-12” występuje większy wzrost wartości deformacji po jednym pełnym cyklu obciążenia niż w przypadku pierwszej grupy.

We wszystkich przypadkach przedstawionych graficznie jedynie miary średnie (średnia arytmetyczna dla całej zbiorowości oscyluje w przedziale $-20 \div 0$ mm).

Na podstawie zestawień wykonanych w załączniku trzecim można stwierdzić, że deformacje są znacznie większe w przypadku drugiej grupy. Także wartości kwantyli i odchyleń świadczą o większym zróżnicowaniu geometrycznym oraz większych wartościach deformacji.

8.4.4. Analiza zbiorników o numerach 13 i 14

Zbiornik numer 13, o identycznej konstrukcji jak zbiorniki grupy „7-12”, ma zdecydowanie większe odchylenia kształtu płaszcza. Obszar zmienności deformacji dla tego obiektu wynosi od -279 do 146 mm – co daje obszar zmienności o rozpiętości 425 mm.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 71
--	--	----------------------------

Na podstawie części analitycznej oraz wykresu obszaru zmienności można stwierdzić, że wzrost wielkości deformacji następuje wraz ze wzrostem wysokości obiektu (szczególnie od 14 poziomu pomiarowego wzwyż). Szczególnie duże są odchylenia skierowane do wnętrza zbiornika. Deformacje ujemne o wartościach większych od -100 mm stanowią około 100 pomiarów na łączną ilość punktów pomiarowych wynoszącą 720.

Dla przedstawienia, że wartości imperfekcje są niezależne od wielkości zbiorników w tym miejscu prezentowane są opracowania statystyczne dla zbiornika nr 14, o pojemności 5000 m³.

Imperfekcje geometryczne wahają się w przedziale od -133 do 98 mm, przy maksymalnym rozmiarze przedziału zmienności 202 mm. W przypadku tego zbiornika aż około 550 punktów pomiarowych, na całkowitą ich liczbę równą 720, wykazuje wartości ujemne. Szczególnie dobrze zobrazowane jest to na wykresach częstości i częstości sumarycznej.

8.4.5. Podsumowanie

Na podstawie wcześniej przytoczonych faktów dotyczących statystycznej oceny odchyłek geometrycznych walcowej powłoki płaszcza można wnioskować, że zmiana rozkładu sił wewnętrznych w największym stopniu wystąpi w przypadku zbiorników nr 14 i 13 gdzie mamy do czynienia z największymi deformacjami. W następnej kolejności charakter zaburzenia w rozkładzie sił wewnętrznych większy będzie dla obiektów grupy oznaczonej numerami „7-12” niż grupy „1-6”.

Powyższe spostrzeżenia zostaną sprawdzone na podstawie analiz numerycznych opisanych w następnych rozdziałach.

Wyniki analiz statystycznych imperfekcji geometrycznych dla zbiorników były przedmiotem publikacji [8-3], [8-4], [8-5].

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 72
--	--	----------------------------

9. Analizy numeryczne powłok z imperfekcjami

Analizę numeryczną powłok z imperfekcjami geometrycznymi przeprowadzono dla trzech grup konstrukcji powłokowych z imperfekcjami:

- a) powłoki testowe z ściśle określonymi imperfekcjami geometrycznymi,
- b) powłoki rzeczywistych obiektów zbiornikowych,
- c) powłoka zbiornika poddawana badaniom tensometrycznym.

Niniejszy podział ma na celu umożliwienie dokonania analizy różnych zagadnień.

Celem poszczególnych grup analiz jest znalezienie odpowiedzi na następujące zagadnienia:

- a) powłoki testowe:
 - sprawdzenie zachowania się sił wewnętrznych w powłoce przy ściśle zdefiniowanych imperfekcjach odpowiednio co do typu oraz ich wartości,
 - analizę poprawności doboru siatki podziału elementowego,
 - analizę zbieżności procesu obliczeniowego,
 - dobór parametrów programowych wpływających na rozwiązanie numeryczne,
 - dobór właściwych praw materiałowych i hipotez wytrzymałościowych,
- b) powłoki obiektów rzeczywistych:
 - określenie zakresu zmienności sił wewnętrznych w powłokach z imperfekcjami określonymi w sposób dyskretny,
 - określenie zmienności naprężeń dla powłoki,
 - weryfikacja wartości przemieszczeń oraz deformacji powłoki pod obciążeniem hydrostatycznym w porównaniu z przemieszczeniami pomierzonymi na obiekcie,
 - określenie wielkości rezerwy nośności dla zakresu sprężystego z uwzględnieniem nadatku korozyjnego oraz bez niego,
 - próba określenia bezpiecznych wartości wstępnych imperfekcji geometrycznych powłoki,
- c) powłoka zbiornika poddana badaniom tensometrycznym:
 - porównanie metod numerycznych określenia wartości naprężeń powierzchniowych z wartościami uzyskanymi w tensometrycznym teście badawczym przeprowadzonym na rzeczywistym obiekcie.

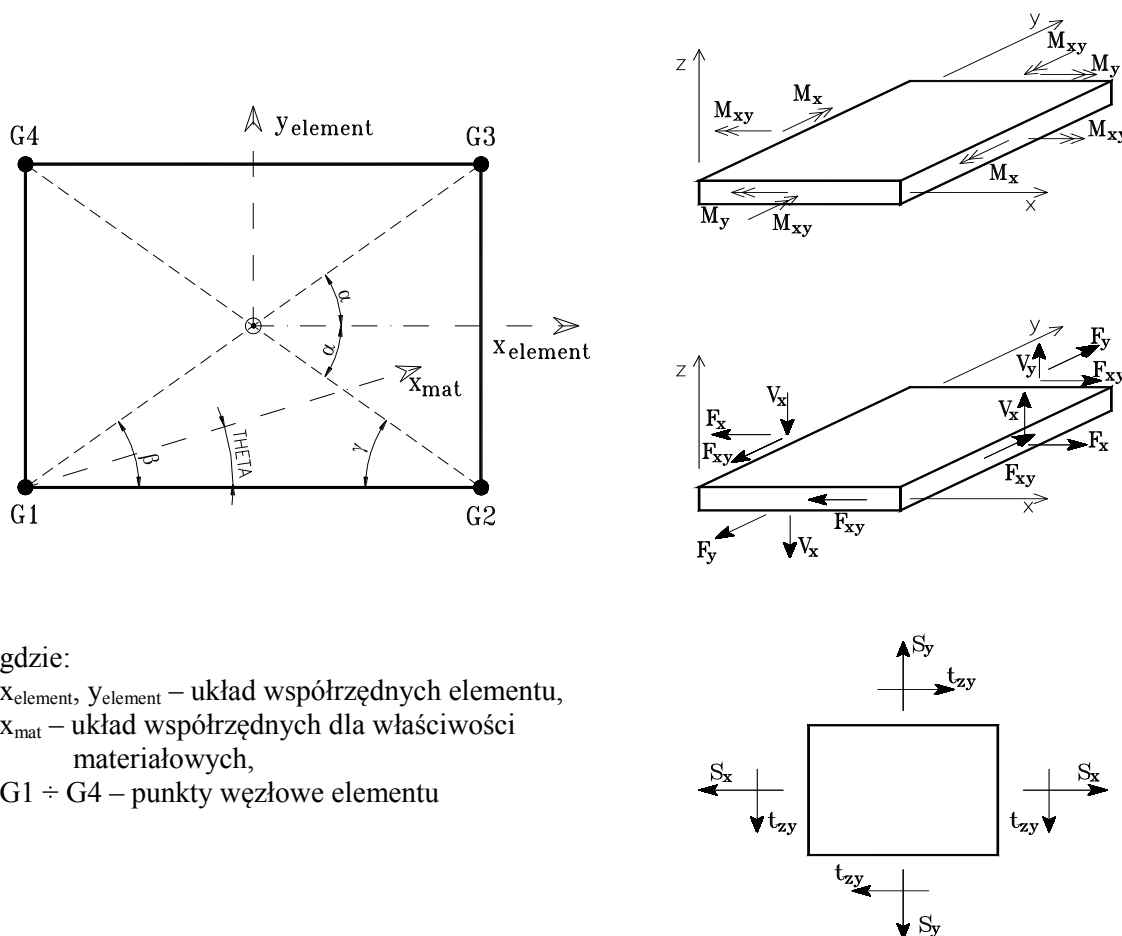
9.1. Wykorzystywany aparat numeryczny

W przeprowadzanych obliczeniach numerycznych wykorzystano gotowy, komercyjny pakiet oprogramowania analitycznego pod nazwą MSC/Nastran for Windows firmy MSC

Software [9-4]. Poniżej zostanie przedstawiony krótki opis stosowanych elementów, parametrów i metod prowadzenia obliczeń przyjętych do rozwiązania wszystkich powyżej przedstawionych zagadnień numerycznych.

9.1.1. Rodzaje stosowanych elementów numerycznych

a) element typu CQUAD4 – we wszystkich analizach numerycznych do modelowania stalowej powłoki płaszczu zbiornika jak i innych jego elementów konstrukcyjnych użyto czterowęzłowego, czterobocznego elementu płaskiego o nazwie CQUAD4. CQUAD4 to izoparametryczny element łączący cechy elementu membranowego oraz płaskiego płytowego elementu giętnego. Opis elementu oraz orientacja dodatnich sił wewnętrznych oraz naprężeń zostały podane na rysunku 9.1. Element posiada pięć stopni swobody i oparty jest na założeniach pięcioparametrowej teorii powłok Reissnera - Mindlina. Problem braku rotacyjnego stopnia swobody wokół normalnej do powierzchni elementu został uwzględniony w programie poprzez zastosowanie dodatkowych funkcji numerycznych [9-2], [9-3].

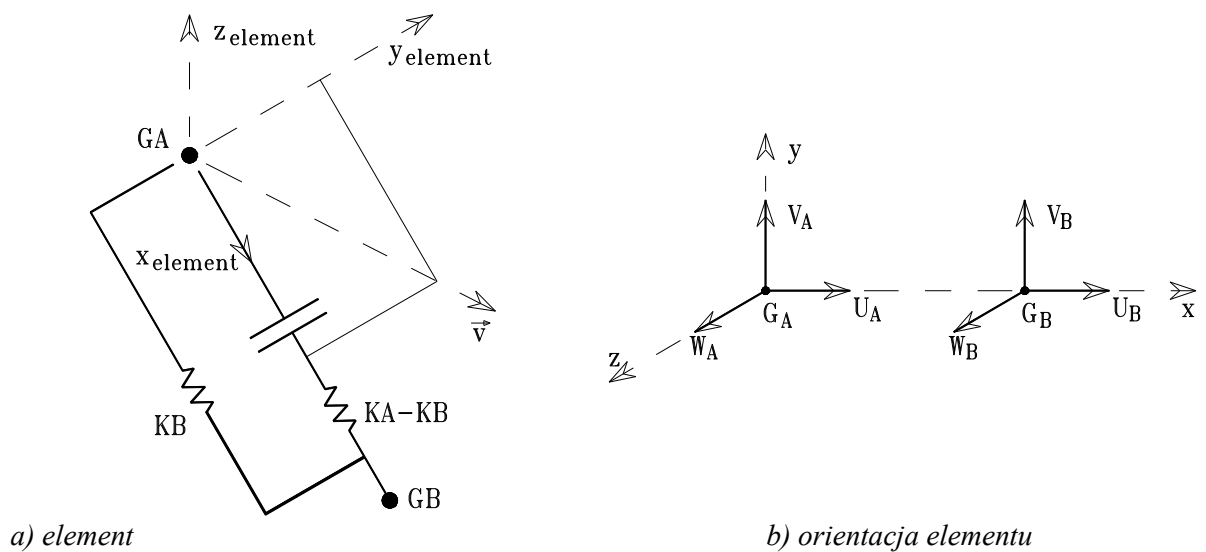


a) geometria elementu

b) orientacja sił wewnętrznych oraz naprężeń

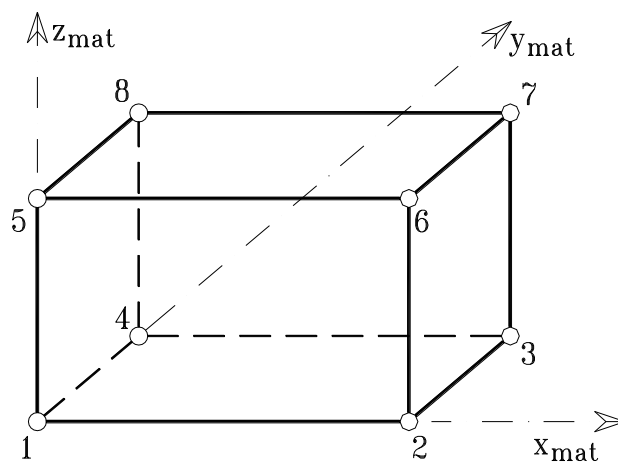
Rys. 9.1. Element modelujący konstrukcję stalową

- b) element typu GAP - element ten wykorzystywany jest do reprezentacji punktów i powierzchni, które mają być odseparowane, zamknięte lub mogą się wzajemnie przemieszczać poprzez wzajemny poślizg – element modelujący szczelinę w formie kontaktu pomiędzy zbiornikiem a fundamentem. GAP jest elementem nieliniowym mającym różną sztywność na ściskanie, rozciąganie i ścinanie. Kształt opisywanego elementu to liniowy element łączący dwa węzły leżące na dwóch płaszczyznach wymagających odseparowania. W analizowanych zagadnieniach wykorzystano tylko sztywność na ściskanie oraz ścinanie modelujące tarcie pomiędzy powierzchniami kontaktowymi.



Rys. 9.2. Element modelujący szczelinę kontaktową

- c) element typu CHEXA - liniowy element przestrzenny typu Linear Hexahedron – element ośmiowęzłowy, który wykorzystano do modelowania posadowienia zbiornika poprzez podanie parametrów materiałowych odpowiednio dla piaskowej poduszki fundamentowej i otaczającego ją żelbetowego pierścienia.



Rys. 9.3. Opis elementu przestrzennego modelującego elementy fundamentu

9.1.2. Parametry materiałowe

Dla konstrukcji stalowej analizowanych obiektów modelowanej przez elementy powłokowe przyjęto dwuliniowy model materiału izotropowego idealnie sprężysto – plastycznego. Jako graniczną wartość odkształceń sprężystych przyjęto normową granicę plastyczności określoną w normach przedmiotowych [9-5] dla odpowiednich rodzajów stali (tab. 9.1). Jako kryterium określenia zakresu maksymalnej pracy sprężystej materiału przyjęto warunki przestrzennego wykorzystania naprężeń określone na podstawie hipotezy wytrzymałościowej Hubera-Misesa.

Tablica 9.1. Parametry materiałowe elementów stalowych wg [9-5]

Znak stali	Zakres grubość [mm]	R_e [MPa]	E [GPa]	ν
St3S	$t \leq 16$ mm	235	205	0,3
	$16 < t \leq 40$ mm	225		
18G2A	$t \leq 16$ mm	355		
	$16 < t \leq 30$ mm	345		

Dla pozostałych materiałów i elementów występujących w analizowanych modelach przyjęto następujące parametry materiałowe – tab. 9.2 .

Tablica 9.2. Parametry materiałowe innych elementów

Rodzaj elementu	E [GPa]	ν	wg
poduszka piaskowa	0,150	0,20	[9-8]
pierścień żelbetowy	25	0,166	[9-7]

Rodzaj elementu	K_C [MN/m]
GAP - szczelina kontaktowa	500

9.1.3. Własności materiałowe

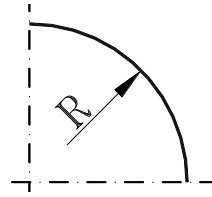
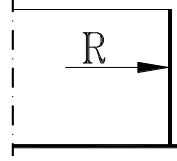
a) powłoki testowe - grubości elementów dla modelowanych powłok zostały przyjęte na podstawie obliczeń statyczno - wytrzymałościowych zgodnych z wymaganiami aktualnej normy projektowania zbiorników [9-6], bez uwzględnienia współczynników obciążenia, przewidzianych w metodzie stanów granicznych, dla magazynowanej cieczy. Odpowiednio do promienia obiektu przyjęto wykonanie powłok o:

- jednakowej grubości na całej wysokości dla powłoki o promieniu $R=10,0$ m
- skokowo zmiennej grubości na wysokości dla powłoki o promieniu $R=30,0$ m

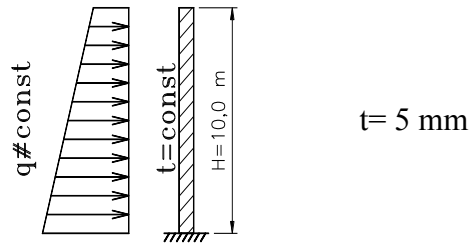
Przyjęte grubości zostały przedstawione w tablicy 9.3.

Tablica. 9.3. Geometria powłok testowych

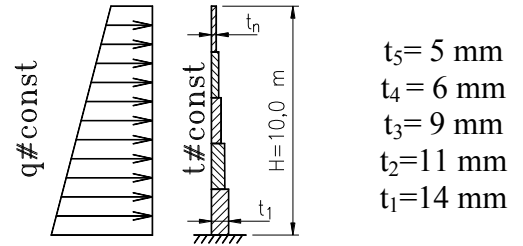
a) rodzaj testowanej powłoki



b) schemat testowanej powłoki o stałej grubości $t = \text{const}$ $R = 10,0$ m



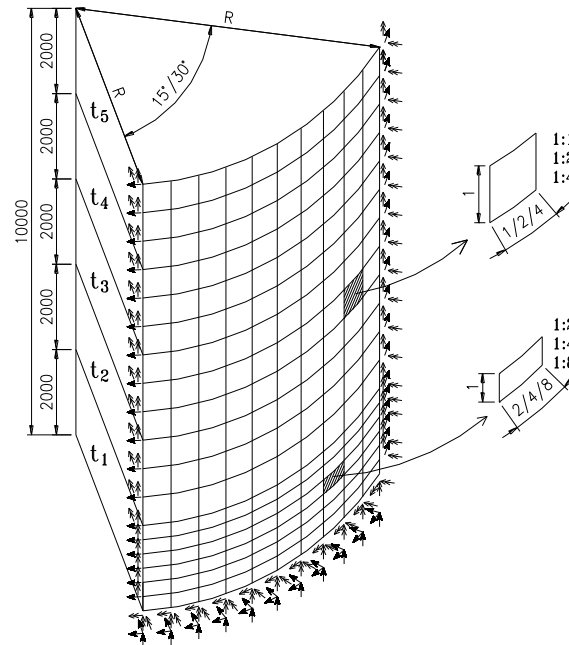
c) schemat testowanej powłoki o zmiennej grubości $t \neq \text{const}$, $R = 30,0$ m



- b) obiekty rzeczywiste - analizy numeryczne zostały wykonane dla obiektów o skokowo zmiennych grubościach poszczególnych pierścieni płaszcza określonych w zrealizowanych projektach technicznych [9-1]. Obliczenia wykonano dla dwóch wariantów grubości poszczególnych pierścieni – grubości z nadładkiem na korozję oraz bez niego.

9.1.4. Siatka podziału elementowego

- a) powłoki testowe - siatka podziału elementowego została przyjęta z założeniem wykonania testowania wielkości elementu w zależności od przyjętej proporcji. Analizowane proporcje wynosiły odpowiednio: 1:1, 1:2, 1:4 dla zasadniczej części powłoki. Dla najniższej położonego pierścienia zastosowano podział odpowiednio 1:2, 1:4, 1:8, który odpowiadał dwukrotnemu zagęszczeniu elementów w kierunku pionowym (rys. 9.4). Porównawcze zestawienie wyników dla testowanych wielkości elementów podano w załączniku 4.



Rys. 9.4. Zasada dyskretyzacji powłoki testowej

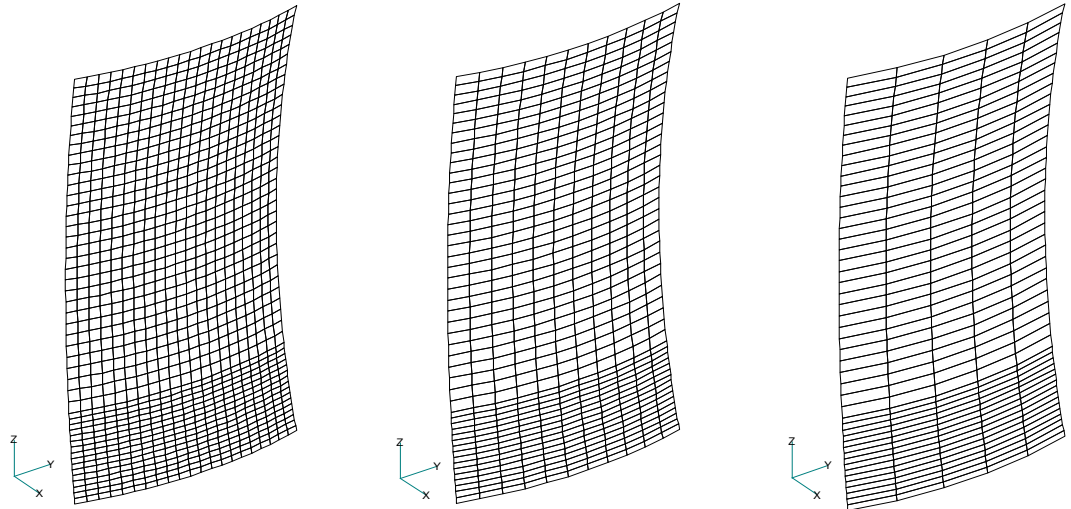
- b) obiekty rzeczywiste – siatka podziału elementowego modelu numerycznego płaszczy zbiorników została oparta na siatce pomiarów geodezyjnych przedstawionych w załączniku nr 2 do niniejszej pracy. Dodatkowo wprowadzono pięciokrotne zagęszczenie punktów węzłowych dla analizowanego modelu w kierunku obwodowym oraz dwu i czterokrotne dla kierunku pionowego. Daje to podział zbiornika na 200 elementów po obwodzie oraz 40-44 elementy po wysokości. Większe zagęszczenie zostało zastosowane w pierwszym dolnym pierścieniu płaszcza modelowanego zbiornika w celu dokładniejszego uchwycenia występujących tam zaburzeń brzegowych. Taka siatka podziału elementowego okazała się wystarczająca dla przedstawienia stanu zaburzeń sił wewnętrznych. W załączniku nr 5 przedstawiono porównanie uzyskanych wartości sił wewnętrznych oraz przemieszczeń dla dwukrotnie gęściejszej siatki podziału elementowego dla powłoki płaszcza. Uzyskane w ten sposób wyniki pozwalają stwierdzić, iż wyżej opisywana siatka podziałowa jest wystarczająca do dalszych analiz.

9.1.5. Opis modeli

a) powłoki testowe

W przypadku powłok z imperfekcjami obrotowo - symetrycznymi – oznaczonych w dalszej części rozdziału jako typu A ÷ F (tab. 9.4) – analizy prowadzono na wycinku powłoki o kącie środkowym $\alpha=30$ stopni dla $R=10$ m i $\alpha=15$ stopni dla $R=30$ m. Wielkość wycinka powłoki została tak dobrana aby wyeliminować wpływ zaburzeń brzegowych podparcia na krawędzi pionowej na stan naprężeń w środkowej jej części.

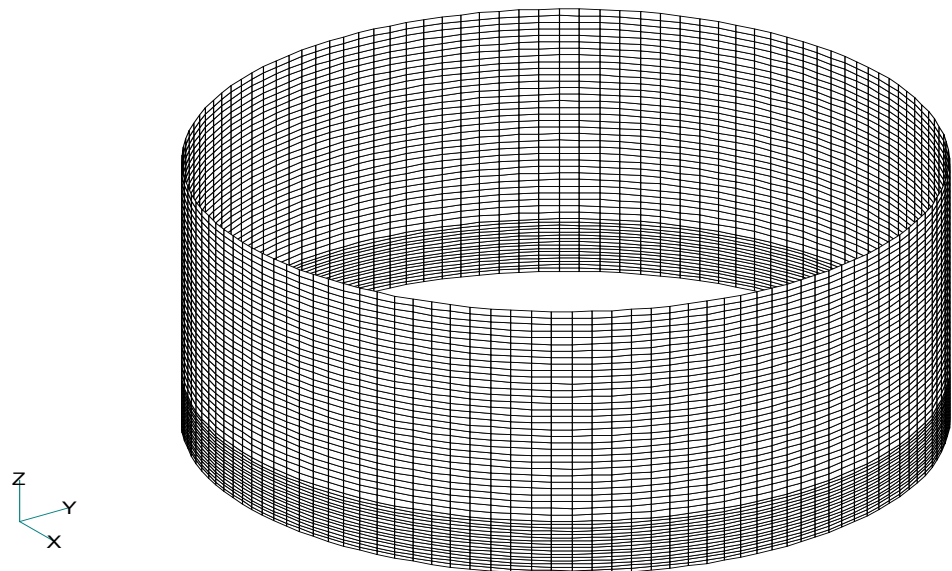
Na dolnej krawędzi powłoki zablokowano wszystkie stopnie swobody tworząc warunki utwierdzenia. Na krawędziach bocznych po wysokości zastosowano podparcie zapewniające warunki ciągłości powłoki.



Rys. 9.5. Przykładowe siatki podziału elementowego dla powłoki testowej z imperfekcjami obrotowo - symetrycznymi (typ A, $R=10,0$ m)

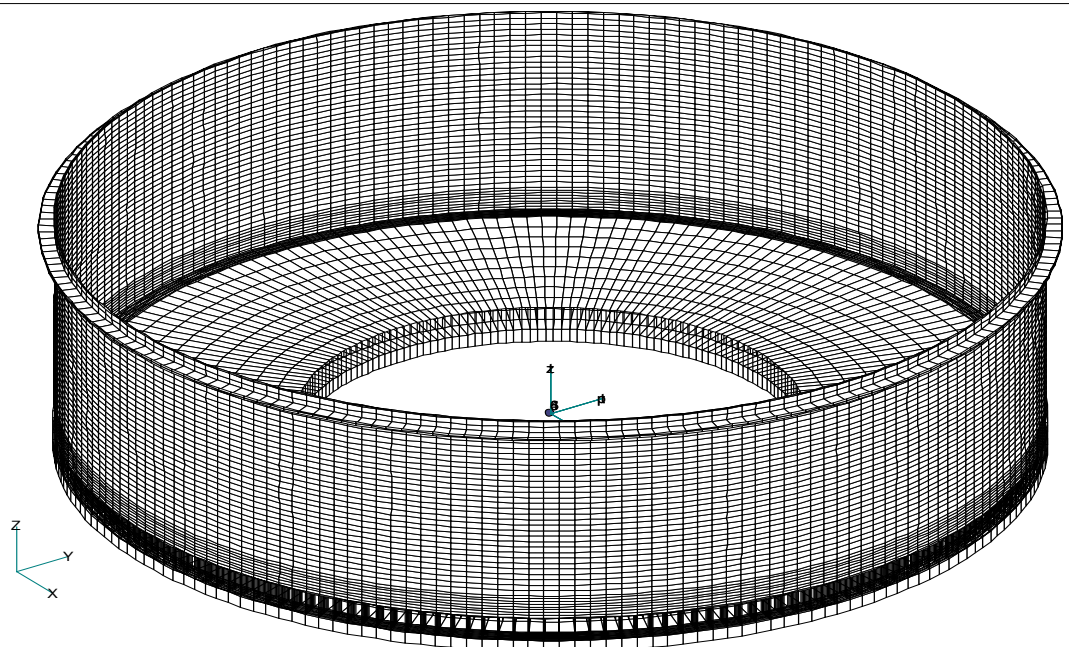
W przypadku powłok z imperfekcjami obwodowymi – typu G ÷ H (tab. 9.5) – obliczenia przeprowadzono na modelu pełnego walca w celu wyeliminowania wszelkich zaburzeń brzegowych związanych z podparciem. Jak dla poprzednich i tu podparcie dolnej krawędzi powłok testowych zostało przyjęte jako utwierdzone.

Omawiane modele obliczeniowe tworzone były w oparciu o procedury generowania elementów zawarte w programie obliczeniowym.

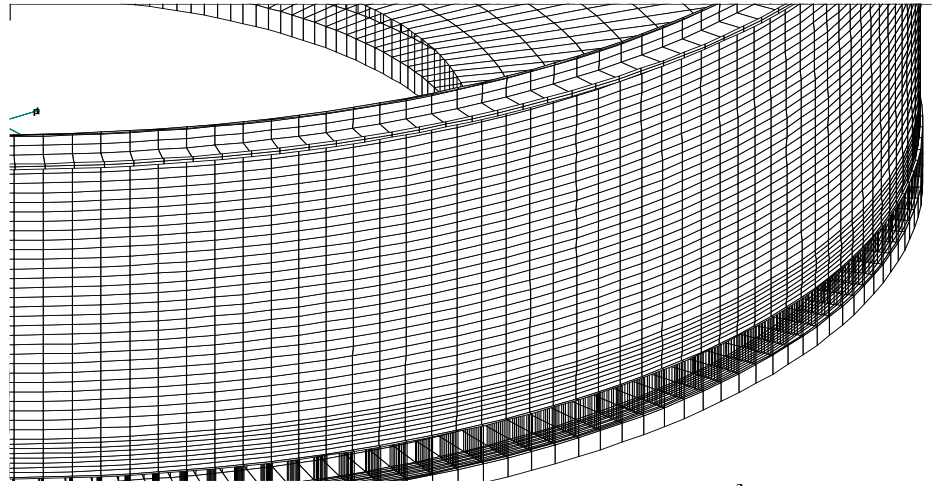


Rys. 9.6. Przykładowa siatka podziału elementu dla analiz z imperfekcjami obwodowymi ($R=10,0$ m)

- b) obiektów rzeczywistych - numeryczny model rzeczywistego zbiornika został stworzony przy wykorzystaniu specjalnie opracowanego programu przetwarzającego, który na podstawie pomierzonych odchylek geometrii płaszczu zbiornika oraz informacji o podstawowej geometrii obiektu tworzy zbiór numeryczny modelu przestrzennego zbiornika stalowego. Program umożliwia wprowadzanie informacji o żądanej liczbie podziałów w kierunku obwodowym i po wysokości. W jednym cyklu przetwarzania danych program przygotowuje zbiór danych węzłowych i elementowych z odpowiednimi własnościami materiałowymi zarówno dla analizowanego płaszczu zbiornika jak dna i stężenia wiatrowego. Numeryczny model zbiornika został na całej powierzchni dna podparty na zespole elementów typu „gap” modelujących powierzchnię kontaktową pomiędzy stalowym dnem zbiornika a przestrzennym, piaskowo - żelbetowym blokiem fundamentowym. W celu zabezpieczenia modelu zbiornika przed wystąpieniem ruchu sztywnego zastosowano blokady przesuwu na dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach poziomych X i Y oraz kąta obrotu względem osi Z w osi obrotu, w dnie zbiornika. Podparcie przestrzennego bloku fundamentowego zrealizowano przez odebranie wszystkich stopni swobody na dolnej jego płaszczyźnie.



Rys. 9.7. Model numeryczny zbiornika $V=50\ 000\ m^3$



Rys. 9.8. Model numeryczny zbiornika $V=50\ 000\ m^3$ - zbliżenie

9.1.6. Obciążenie

W analizowanych modelach powłok testowych oraz zbiorników rzeczywistych zastosowano kombinację dwóch rodzajów obciążeń:

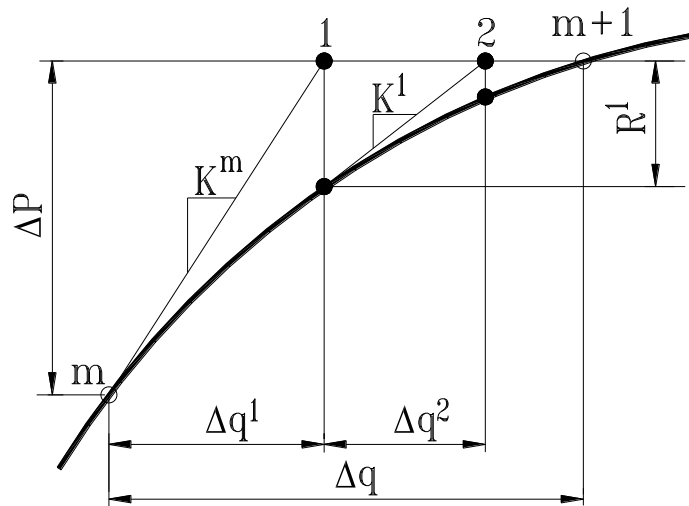
- ciężar własny konstrukcji stalowej i fundamentu, dla zbiornika został zrealizowany przez podanie własnych ciężarów objętościowych poszczególnych materiałów oraz kierunku i wartości ziemskiego przyspieszenia grawitacyjnego,
- liniowo zmiennego ciśnienia powierzchniowego skierowanego prostopadle do powierzchni każdego z powłokowych elementów składowych modelu – ciśnienie to modeluje parcie hydrostatyczne cieczy magazynowanej w obiekcie. We wszystkich zadaniach numerycznych jako ciecz obciążającą zastosowano wodę o ciężarze właściwym $9,81\ kN/m^3$.

Modelowe wysokości parcia cieczy wynosiły odpowiednio:

- 10,0 m – całkowitą wysokość modelowanej powłoki, w przypadku powłok testowych,
- 17,0 m dla zbiorników rzeczywistych o pojemności $50\ 000\ m^3$, wysokość ta odpowiada maksymalnemu poziomowi cieczy magazynowanej w trakcie eksploatacji.

9.1.7. Metoda rozwiązania problemu numerycznego

Do numerycznego rozwiązania analizowanych problemów nieliniowych zastosowano przyrostową metodę iteracyjną znaną pod nazwą pełnej metody Newtona - Raphsona (metoda stycznych). Metoda ta charakteryzuje się określaniem sztywności dla każdego kroku iteracji wykonywanego w trakcie poszukiwania rozwiązania. W analizowanych przypadkach dużych nieliniowości geometrycznych obiektu metoda ta okazała się metodą szybko zbieżną.

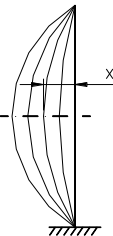
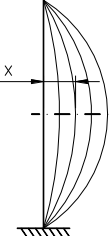
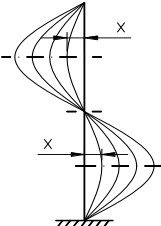
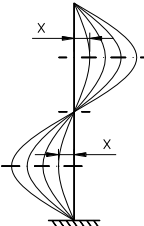
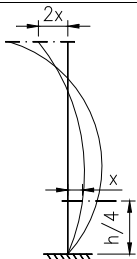
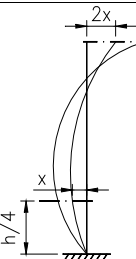


Rys. 9.9. Przebieg iteracji dla pełnej metody Newtona - Raphsona
 P – przyrost obciążenia; R - siła resztkowa; K – sztywność styczna;
 q – przemieszczenie; 1,2 – kroki iteracji

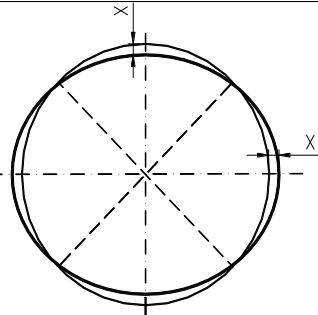
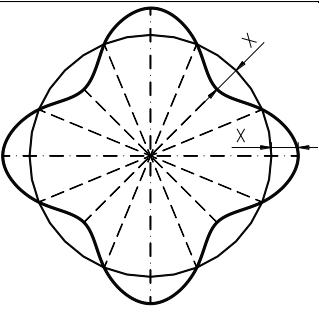
9.2. Powłoki testowe z imperfekcjami

W ramach testowania powłok z imperfekcjami obrotowo - symetrycznymi jak i obwodowymi przeprowadzono dokładne obliczenia porównawcze dla wybranych typów deformacji podanych w poniższych tablicach. W tablicach oprócz kształtu założonej imperfekcji podano jej analizowane wartości.

Tablica. 9.4. Typy analizowanych imperfekcji obrotowo-symetrycznych

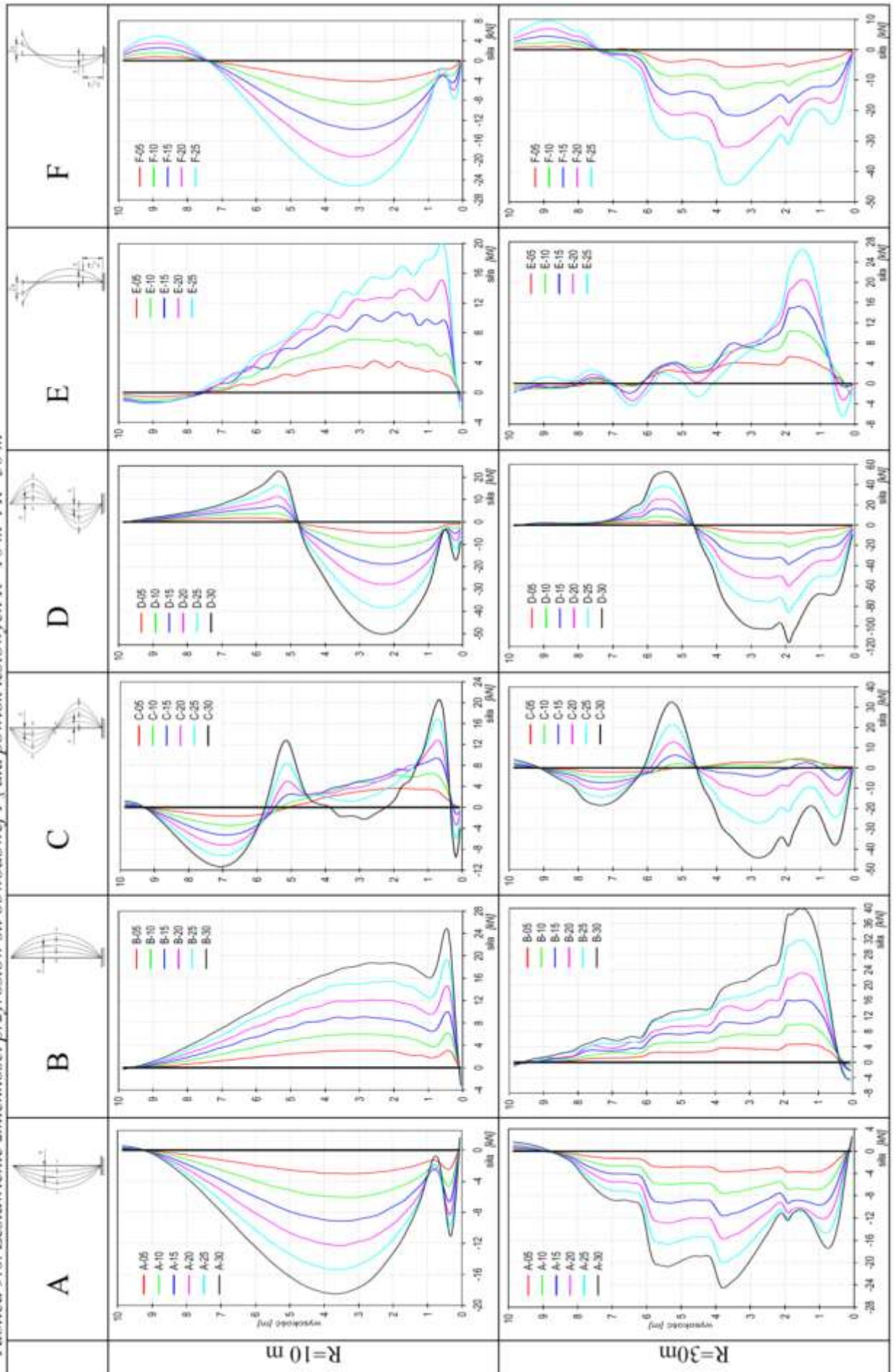
Analizowane typy imperfekcji		Wartość testowanej imperfekcji
Typ "A"	Typ "B"	
		x = 50 mm x=100 mm x=150 mm x=200 mm x=250 mm x=300 mm x=500 mm
Typ "C"	Typ "D"	
		x = 50 mm x=100 mm x=150 mm x=200 mm x=250 mm x=300 mm
Typ "E"	Typ "F"	
		x = 50 mm x=100 mm x=150 mm x=200 mm x=250 mm

Tablica. 9.5. Typy analizowanych imperfekcji obwodowych

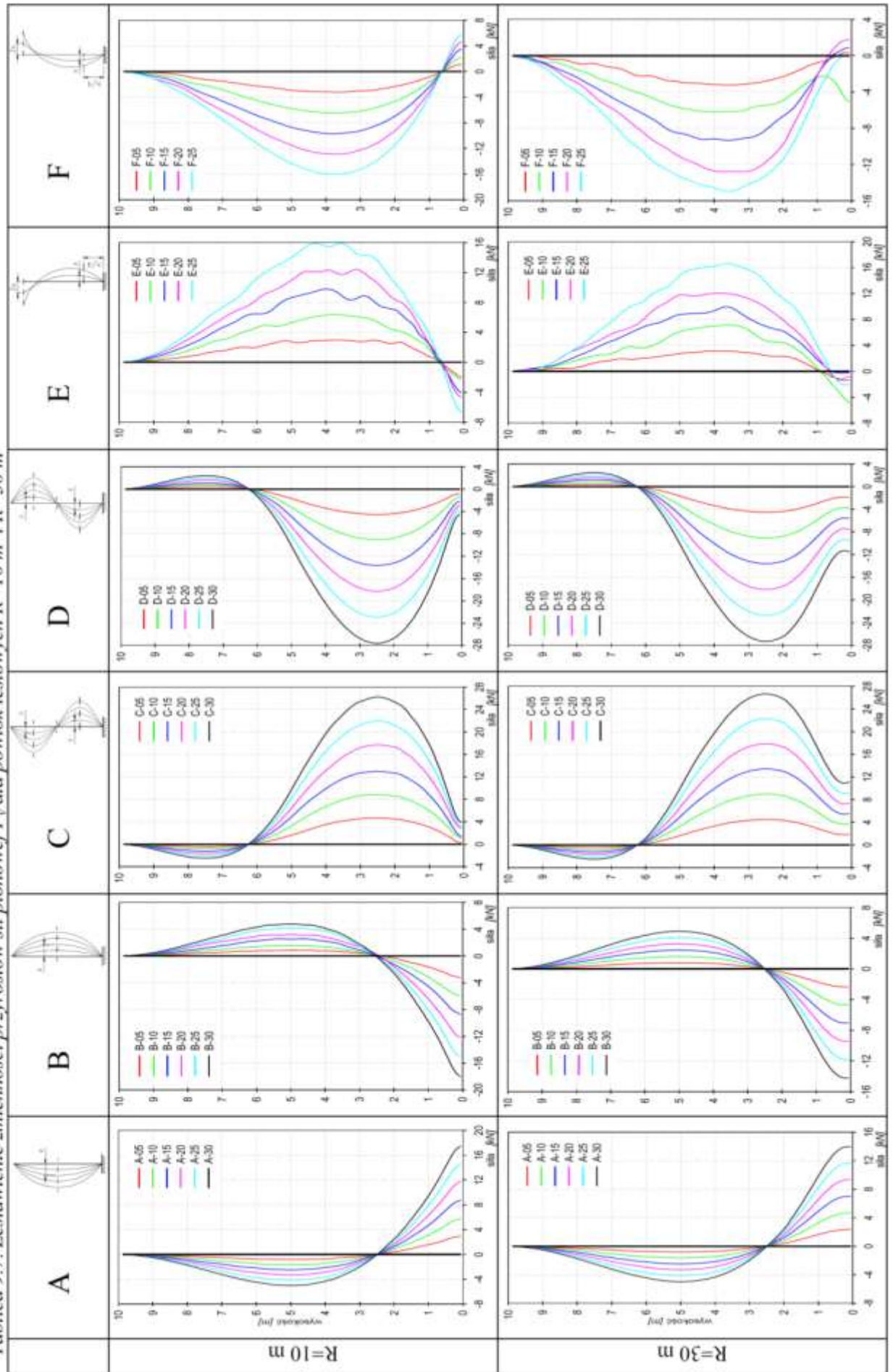
Analizowane typy imperfekcji		Wartość testowanej imperfekcji
Typ "G"	Typ "H"	
		x = 50 mm x=100 mm x=150 mm x=200 mm

Zbiorcze zestawienie prezentujące przyrosty bezwzględne podstawowych sił powłokowych oraz charakter zmian – sił obwodowych i pionowych – podano w kolejnych tablicach.

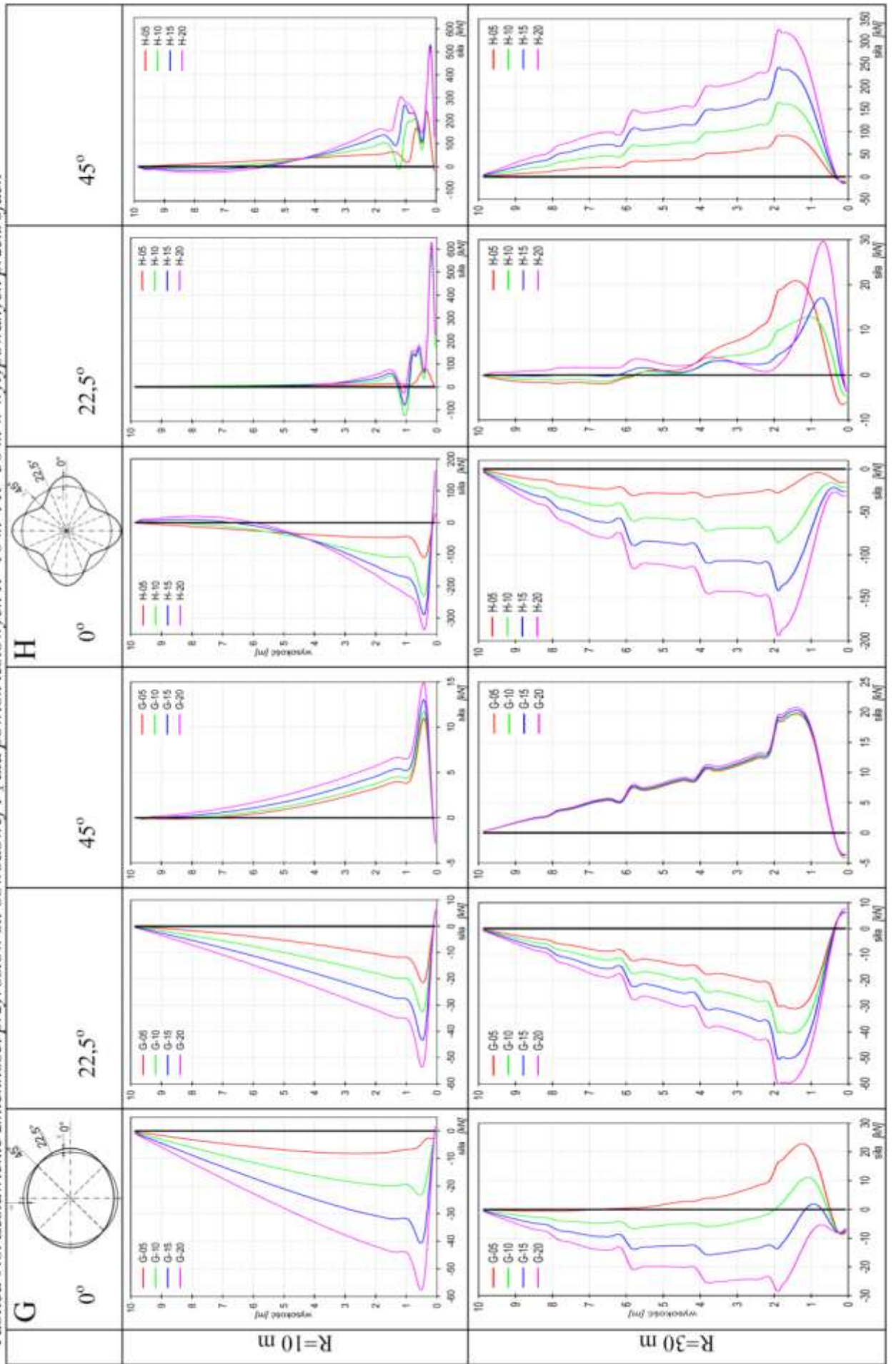
Tablica 9.6. Zestawienie zmienności przyrostów F_x dla powłok testowych $R=10\text{ m}$ i $R=30\text{ m}$



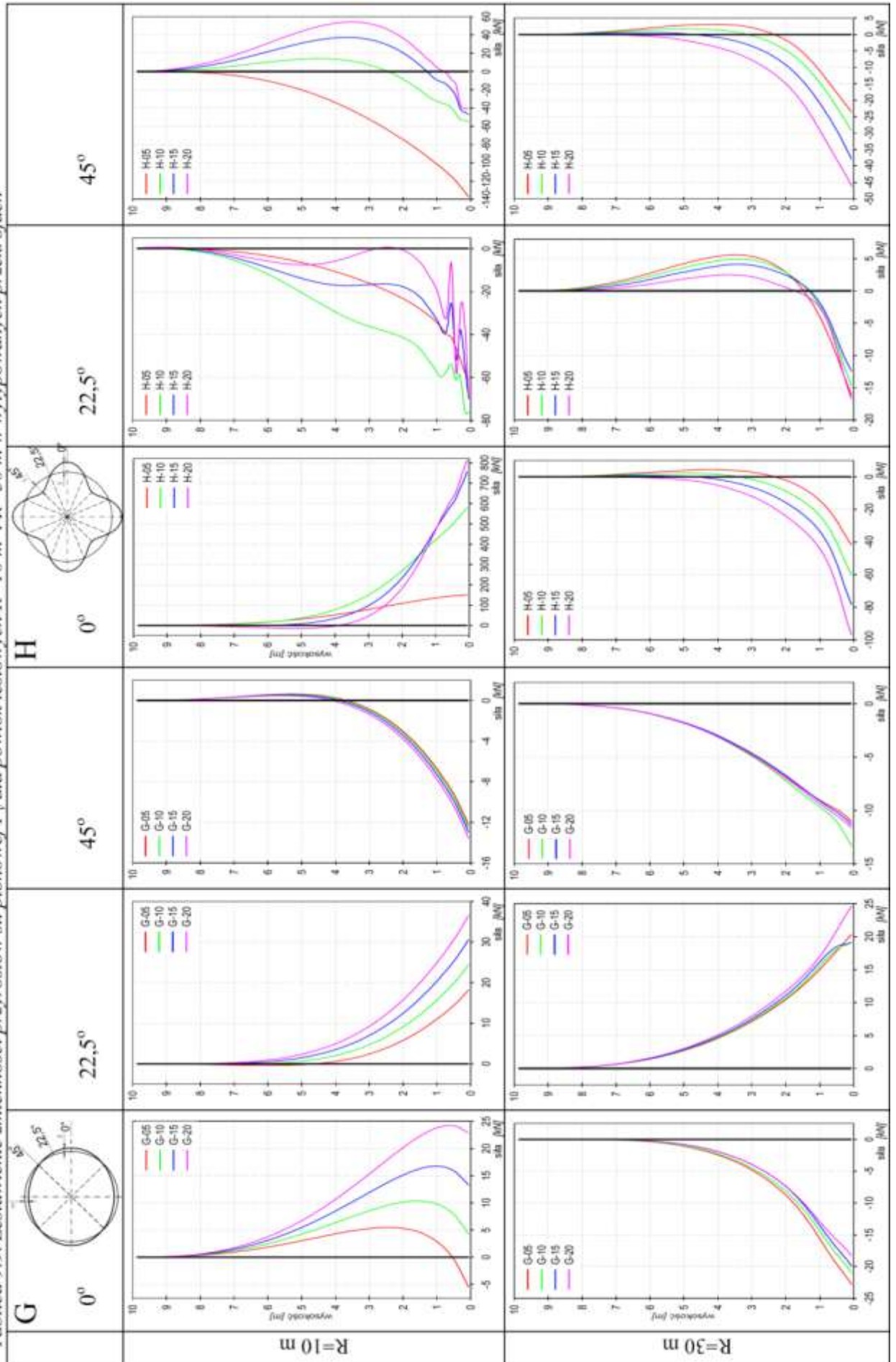
Tablica 9.7. Zestawienie zmienności przyrostów F_v dla powłok testowych $R=10\text{ m}$ i $R=30\text{ m}$



Tablica 9.8. Zestawienie zmienności przyrostów F_x dla powłok testowych $R=10\text{ m}$ i $R=30\text{ m}$ w wytępowanych przekrojach



Tablica 9.9. Zestawienie zmienności przyrostów sił pionowej F_v dla powłok testowych $R=10\text{ m}$ i $R=30\text{ m}$ w wytypowanych przekrojach



Zaprezentowane wykresy przyrostów sił wewnętrznych pozwalają na podanie następujących spostrzeżeń:

- a) we wszystkich analizowanych przypadkach imperfekcji, zarówno obrotowo - symetrycznych jak i obwodowych, stwierdzono znaczne odstępstwa od zakładanego teoretycznego wykresu zmienności siły pionowej w powłoce pochodzącej zasadniczo od jej ciężaru własnego. Zmianie ulega nie tylko kształt wykresu, ale również można stwierdzić, że wartości przyrostów są kilkakrotnie większe niż wartości dla konstrukcji idealnych (załącznik nr 4). Na wszystkich pokazanych wykresach siła ta przyjmuje nie tylko wartość ujemną odpowiadającą przypadkowi ściskania, od ciężaru własnego konstrukcji powłokowej, ale występują miejsca, gdzie siła ta zmienia się w siłę rozciągającą powłokę. Charakter wykresu oraz wartości siły pionowej w wielu przypadkach są podobne i można stwierdzić, że jej wartość w małym stopniu zależy od wielkości promienia zakrzywienia powłoki walcowej i są zgodne dla imperfekcji o tych samych wartościach (tab. 9.7 i tab. 9.9);
- b) siła obwodowego rozciągania powłoki jest odpowiednia do kształtu imperfekcji i ogólnie można przyjąć, że w przypadku imperfekcji ujemnej – skierowanej do wnętrza, przyrosty siły również są ujemne (tab. 9.10), analogiczna sytuacja jest w przypadku imperfekcji dodatniej. Na wykresach przyrostów siły obwodowego rozciągania widoczne są również zmiany spowodowane skokową zmianą grubości powłoki (tab. 9.6);

Tablica 9.10. Zestawienie przyrostów siły obwodowej dla imperfekcji obrotowo-symetrycznej

Typ imperfekcji	Maksymalne przyrosty procentowe siły obwodowego rozciągania powłoki w zależności od wartości charakterystycznej imperfekcji [cm]							
	Powłoki testowe o promieniu R=10 m				Powłoki testowe o promieniu R=30 m			
	5	10	15	20	5	10	15	20
A	-0,52	-1,05	-1,59	-2,16	-0,2	-0,44	-0,69	-0,94
B	0,51	1,0	1,5	1,99	0,18	0,38	0,6	0,86
C	0,47	0,79	1,07	1,31	0,15	0,17	0,43	0,87
	-0,58	-1,21	-1,90	-2,66	-0,26	-0,56	-0,97	-1,92
D	-0,65	-1,5	-2,5	-3,79	-0,33	-0,87	-1,59	-2,51
	0,55	1,07	1,61	2,64	0,27	0,67	1,21	1,9
E	0,58	1,07	1,49	1,85	0,21	0,39	0,56	0,76
	-0,84	-1,52	-2,0	-2,29	-0,55	-0,92	-1,09	-0,85
F	-0,64	-1,35	-2,15	-3,02	-0,3	-0,66	-1,11	-1,66
	0,95	2,18	3,62	5,19	0,52	1,2	2,14	3,15

Na podstawie tablicy 9.10 można stwierdzić, iż dla powłok z imperfekcjami obrotowo-symetrycznymi przy wzroście wartości promienia zakrzywienia powłoki, przy tej samej wartości imperfekcji, przyrosty sił obwodowych maleją. Przy analizowanych wielkościach powłok widoczny jest spadek przyrostów sił o około pięćdziesiąt procent przy trzykrotnej zmianie promienia zakrzywienia powłoki z $R=10$ do $R=30$ m. Przyrosty maksymalne siły obwodowej można przeanalizować na podstawie powyższej tablicy.

- c) w przypadku imperfekcji obwodowych widoczne są dużo większe zmiany – siła obwodowa zmienia się na poszczególnych, tych samych poziomach w zależności od zmiany kształtu deformacji, szczególnie duże zmiany widoczne są w strefach uplastycznienia (tab. 9.8).

Tablica 9.11. Zestawienie przyrostów siły obwodowej dla imperfekcji obwodowej

Typ imperfekcji / przekrój		Maksymalne przyrosty procentowe siły obwodowego rozciągania powłoki w zależności od wartości charakterystycznej imperfekcji [cm]							
		Powłoki testowe o promieniu $R=10$ m				Powłoki testowe o promieniu $R=30$ m			
		5	10	15	20	5	10	15	20
G	0°	-1,7	-3,2	-4,6	-6,1	0,9	-0,7	-1,2	-1,7
						-1,0	0,4	0,1	0
	22,5°	-2,2	-3,4	-4,4	-5,5	-1,2	-1,5	-1,9	-2,2
						0,4	0,4	0,3	0,3
	45°	1,1	1,2	1,4	1,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
						0,7	0,7	0,8	0,8
H	0°	-11,4	-23,9	-30,1	-34,9	-3,2	-5,3	-7,4	-9,3
			4	17,3	28,5				
	22,5°	8,9	28,5	26,9	28,7	-0,7	-0,3	-0,1	2
						0,8	0,6	1	
	45°	29,4	38,3	39,1	39,7	-0,8	-0,5		
			-10,5	23,9	-35,4	2,9	9	8,8	11,9

Podobnie jak dla wcześniej omówionych imperfekcji również w przypadku imperfekcji obwodowych dla mniejszych obiektów widoczny jest zdecydowany większy wzrost przyrostów siły obwodowej (tab. 9.11). Widoczny jest również wyraźnie znaczny rozrzut zmienności.

Usytuowanie miejsc o wartości ekstremalnych przyrostów dla każdego typu powłoki można przeanalizować na wykresach przedstawionych w załączniku numer 4.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 89
--	--	----------------------------

Analiza wartości naprężeń w przekrojach modelowanej powłoki stalowej testowanych przypadków geometrycznych pozwala na następujące stwierdzenia:

- a) powłoki z imperfekcjami obrotowo-symetrycznymi - typ A – F (tabl. 9.4):
 - w przypadku powłok z imperfekcjami obrotowo - symetrycznymi o promieniu $R=10$ m, wszystkie wartości naprężeń mieszczą się w zakresie sprężystej pracy materiału, nie występują przypadki przekroczenia określonej normowo obliczeniowej wytrzymałości materiału $-f_d$ (tab. Z4-1, Z4-2),
 - dla przypadku powłok z imperfekcjami obrotowo – symetrycznymi, ale o promieniu $R=30$ m, stwierdzono przekroczenie wartości wytrzymałości obliczeniowej oraz granicy plastyczności materiału w najniższych dolnych elementach siatki podziału elementowego. Zakres plastycznej pracy materiału powłoki nie przekracza wysokości 3-4 cm najniższego szeregu elementów, których wysokość wynosi 12,5 centymetra. Na pozostałej części powłoki przypadki takie nie występują. Efekt ten zaobserwowano we wszystkich przypadkach typów imperfekcji oraz ich wartości. Efekt wzrostu naprężeń w tym rejonie jest związany z przyjęciem uproszczonego schematu obliczeniowego w postaci sztywnego, niepodatnego utwierdzenia, co w rzeczywistej konstrukcji nie występuje, w połączeniu płaszcz - dno dochodzi do redystrybucja sił z uwagi na sztywność blach dna zbiornika oraz podatność podłoża (tab. Z4-3, Z4-4).
- b) powłoki z imperfekcjami obwodowymi – typ G (tab. 9.5):
 - dla powłoki o promieniu $R=10$ m z globalną imperfekcją w postaci elipsy nie stwierdzono przekroczenia granicy plastyczności przy żadnej z wartości imperfekcji, natomiast występuje przekroczenie normowo założonej wytrzymałości obliczeniowej począwszy od niedoskonałości geometrycznej o wartości 10 cm, (tab. Z4-5) przekroczenie tych naprężeń występuje w rejonie ujemnej imperfekcji;
 - dla powłoki o promieniu $R=30$ m z globalną imperfekcją opisywanego typu stwierdzono uplastycznienia materiału powłoki na całej wysokości pierwszego pierścienia siatki podziału elementowego – zasięg strefy uplastycznienia sięga więc około 12 cm ponad założonym poziomem utwierdzenia. Wzrost naprężeń obserwowany jest, podobnie jak dla powłoki o $R=10$ m, na obszarach imperfekcji skierowanej do wnętrza analizowanego obiektu (tab. Z4-6).
- c) powłoki z imperfekcjami obwodowymi – typ H (tab. 9.5):
 - powłoka o promieniu $R=10$ m – począwszy od imperfekcji o wartości dwóch centymetrów stwierdza się wyczerpanie całego zakresu sprężystej pracy materiału.

Strefy uplastycznienia materiału występują w tych fragmentach powłoki na których występuje ujemna wartość imperfekcji. Proces narastania stref uplastycznienia powłoki w zależności od wartości imperfekcji przedstawiono w tablicy załącznika numer 4 (tab. Z4-7) oraz poniżej tabelarycznie (tab. 9.12). W przypadku imperfekcji o wartości 5 cm widoczne są dwie strefy uplastycznienia.

Tablica 9.12. Obszar uplastycznienia materiału przy imperfekcji typu H dla R=10m

Wartość charakterystyczna imperfekcji [cm]	Strefa uplastycznienia materiału powłoki	
	Odcinek obwodu określony kątem [stopnie]	wysokość [cm]
5	36	25 ÷ 75
10	69	0 ÷ 100
15	75	0 ÷ 100
20	83	0 ÷ 112

- powłoka o promieniu R=30 m – podobnie jak dla wcześniej omówionych typów imperfekcji A-F występuje uplastycznienie w miejscu utwierdzenia powłoki. W rejonie ujemnych wartości imperfekcji występuje przyrost naprężeń nie powodujący uplastycznienia materiału (tab. Z4-8).

W zakresie przemieszczeń testowanych powłok wnioski analizy są następujące:

- a) dla powłok z imperfekcjami obrotowo - symetrycznymi w obu analizowanych przypadkach wartości promienia zakrzywienia powłoki R=10 m i R=30 m przyrosty przemieszczeń radialnych, w stosunku do porównawczej powłoki bez imperfekcji, nie przekraczają wartości jednego milimetra, wielokrotnie większe są wartości przemieszczeń pionowych, co związane jest zachowaniem się powłoki z imperfekcją pod obciążeniem o kierunku poziomym. Przyrosty przemieszczeń pionowych mieszczą się w przedziale od 2-6 mm (rys. Z4-1 ÷ Z4-24)
- b) w analizie powłok z imperfekcją w postaci elipsy dla obu rodzajów analizowanych powłok przyrosty przemieszczenia radialnego mieszczą się w zakresie 3-4 mm, natomiast dla przemieszczeń pionowych przyrosty nie przekraczają 1 mm (rys. Z4-26, Z4-30).
- c) imperfekcja typu H (tab. 9.5) – harmoniczna zmiana imperfekcji obwodowej - jest różna w obu analizowanych wielkościach obiektów; w przypadku powłoki o mniejszym promieniu zakrzywienia występuje tendencja do przyjęcia kołowego kształtu przekroju poziomego powłoki obciążonej przez co przemieszczenia radialne

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 91
--	--	----------------------------

mają duże wartości, są rzędu wielkości amplitudy zadanej imperfekcji - dobrze widoczne jest to na górnej, swobodnej krawędzi analizowanej powłoki. Przemieszczenia pionowe osiągają w tym przypadku wartość około 40 mm (rys. Z4-28).

Dla powłoki o promieniu $R=30$ m zjawisko takie już nie występuje – całkowite przemieszczenia radialne mają wartość około 35 mm, a przyrosty przemieszczenia mieszczą się w zakresie od $-5 \div 9$ mm. Przyrosty przemieszczenia pionowego w tym przypadku nie przekraczają 1 mm (rys. Z4-32).

9.2.1. Analiza doboru siatki podziału elementowego dla powłok testowych

W trakcie analiz numerycznych dla wcześniej opisanych przypadków powłok dokonano weryfikacji doboru wielkości siatki podziału elementowego pod względem zbieżności uzyskiwanych wyników. Wybrany fragment tych analiz został przedstawiony w tabelicy 9.13 zamieszczonej na następnej stronie. W tabelicy przedstawiono porównanie podstawowych wartości sił powłokowych. Wyniki zaprezentowano dla powłoki wzorcowej, bez imperfekcji, oraz dla czterech typów imperfekcji A ÷ D o różnych wartościach charakterystycznych zakładanej imperfekcji. Prezentacji dokonano w trzech wytypowanych poziomach siatki podziału elementowego dla analizowanych powłok. Można stwierdzić, że w przypadku siły obwodowej, zróżnicowanie uzyskanych wartości jest bardzo małe i wynosi maksymalnie:

- 0,11 % dla dyskretyzacji 1:2 w stosunku do dyskretyzacji powłoki typu 1:1,
- 0,21 % dla dyskretyzacji 1:4 w stosunku do dyskretyzacji powłoki typu 1:1.

Zróżnicowanie uzyskanych wartości dla siły pionowej jest znacznie większe. Widoczne jest to wyraźnie dla wartości podanych w tabeli. Maksymalne zróżnicowanie wynosi:

- 139,13 % dla dyskretyzacji 1:2,
- 44,12 % dla dyskretyzacji 1:4.

Duże zróżnicowanie obliczanych wartości sił pionowych związane są z zapisem funkcji kształtu dla elementu. Wartości siły pionowej podlegają znacznym zmianom w zależności od rodzaju imperfekcji i znacznie odbiegają od wartości dla powłok idealnych. Rozbieżności otrzymanych wyników są kilkunastokrotne.

Zmienność wartości momentu zginającego dla analizowanych powłok jest niewielka. Różnice przedstawione w omawianej tabeli nie wynoszą więcej niż 0,01 kNm, co przy niewielkich wartościach wynikowych tego momentu daje wzrost procentowy aż o 25 % dla analizowanych wielkości dyskretyzacji.

Tablica 9.13. Analiza zbieżność wartości dla różnych typów imperfekcji

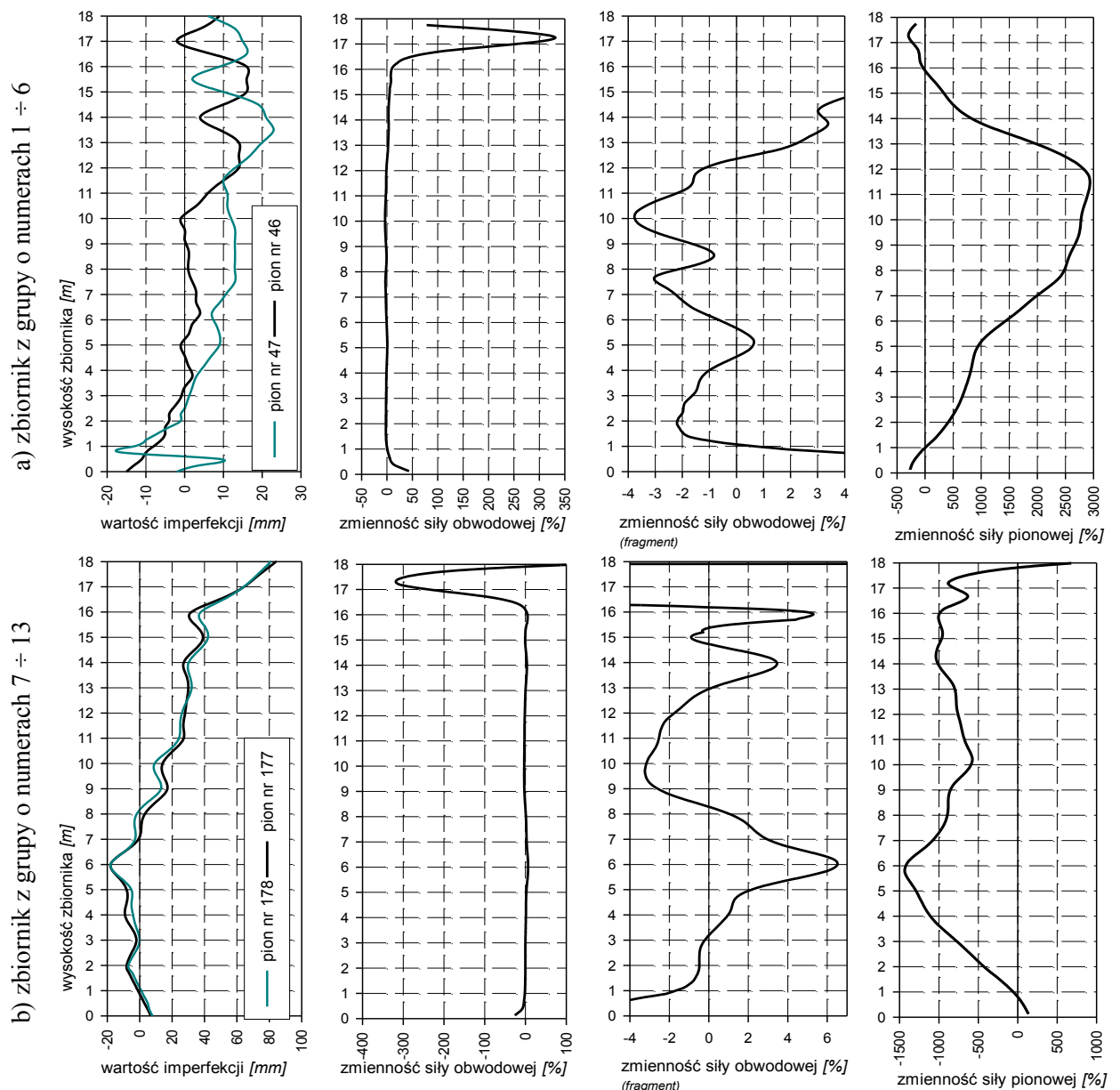
Położenie środką elementu h [cm]	Przyjęta proporcja wymiarów elementowych								
	1:1	1:2	1:4	1:1	1:2	1:4	1:1	1:2	1:4
	Siła obwodowa F_x [kN]			Siła pionowa F_y [kN]			Moment M_y [kNm]		
<i>Powłoka wzorcowa „0” o promieniu R=10 m</i>									
56	975,9	975,6	974,5	-3,13	-3,19	-3,17	-0,06	-0,06	-0,05
262	723,9	723,7	722,9	-2,59	-2,59	-2,60	0,00	0,00	0,00
512	478,4	478,3	477,7	-1,77	-1,77	-1,77	0,00	0,00	0,00
<i>Powłoka wzorcowa „0” o promieniu R=30 m</i>									
56	1518,2	1518,5	1518,6	-6,86	-5,86	-6,60	-1,94	-1,94	-1,93
262	2145,1	2145,0	2144,8	-3,70	-3,60	-3,59	-0,18	-0,17	-0,17
512	1427,1	1427,1	1426,9	-1,91	-1,98	-1,98	0,05	0,05	0,05
<i>Powłoka z imperfekcją typu „A” o promieniu R=10 m, wymiar charakterystyczny 5 cm</i>									
56	973,8	973,6	972,5	-0,87	-0,95	-0,94	-0,06	-0,06	-0,05
262	720,9	720,8	720,0	-2,67	-2,70	-2,68	0,00	0,00	0,00
512	475,9	475,8	475,3	-2,60	-2,59	-2,59	0,00	0,00	0,00
<i>Powłoka z imperfekcją typu „A” o promieniu R=30 m, wymiar charakterystyczny 5 cm</i>									
56	1516,8	1516,5	1516,5	-6,26	-3,58	-4,45	-1,94	-1,93	-1,93
262	2141,8	2141,8	2141,6	-3,60	-3,65	-3,68	-0,17	-0,17	-0,17
512	1424,2	1424,3	1424,1	-2,81	-2,83	-2,78	0,05	0,05	0,05
<i>Powłoka z imperfekcją typu „B” o promieniu R=10 m, wymiar charakterystyczny 10 cm</i>									
56	981,9	981,3	980,0	-7,53	-7,75	-7,78	-0,06	-0,06	-0,06
262	730,1	729,3	728,9	-1,94	-2,62	-2,42	0,00	0,00	0,00
512	483,1	483,1	482,5	-0,20	0,03	-0,21	0,00	0,00	0,00
<i>Powłoka z imperfekcją typu „B” o promieniu R=30 m, wymiar charakterystyczny 10 cm</i>									
56	1522,5	1522,1	1522,2	-12,62	-9,61	-10,93	-1,94	-1,94	-1,94
262	2152,0	2152,0	2151,8	-3,75	-3,16	-3,42	-0,17	-0,18	-0,17
512	1432,1	1432,1	1432,0	-0,23	-0,55	-0,33	0,05	0,05	0,05
<i>Powłoka z imperfekcją typu „C” o promieniu R=10 m, wymiar charakterystyczny 10 cm</i>									
56	980,3	980,4	979,3	0,34	0,42	0,49	-0,06	-0,06	-0,06
262	729,3	729,2	727,8	6,59	7,54	6,20	0,00	0,00	0,00
512	479,1	479,0	478,5	1,10	1,06	1,05	0,00	0,00	0,00
<i>Powłoka z imperfekcją typu „C” o promieniu R=30 m, wymiar charakterystyczny 10 cm</i>									
56	1517,9	1517,5	1517,7	-2,33	-1,68	-2,43	-1,93	-1,93	-1,93
262	2146,6	2146,6	2146,2	6,36	6,10	5,36	-0,17	-0,17	-0,17
512	1429,3	1429,4	1429,1	0,94	1,00	0,88	0,04	0,05	0,05
<i>Powłoka z imperfekcją typu „D” o promieniu R=10 m, wymiar charakterystyczny 20 cm</i>									
56	971,3	971,1	970,0	-10,9	-10,85	-10,89	-0,06	-0,06	-0,06
262	696,4	696,3	695,6	-20,81	-20,85	-20,87	0,00	0,00	0,00
512	439,5	439,5	439,0	-3,81	-4,23	-4,21	0,00	0,00	0,00
<i>Powłoka z imperfekcją typu „D” o promieniu R=30 m, wymiar charakterystyczny 20 cm</i>									
56	1485,9	1485,9	1485,6	-14,58	-14,16	-15,11	-1,91	-1,91	-1,91
262	2093,0	2092,8	2092,6	-20,56	-21,67	-21,70	-0,17	-0,16	-0,16
512	1447,0	1446,9	1446,4	-6,79	-7,23	-7,73	0,03	0,03	0,03

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 93
--	--	----------------------------

Podsumowując analizę doboru siatki podziału elementowego można stwierdzić, iż wstępnie przyjęte proporcje wymiarów elementów tworzących siatkę wspomnianego podziału dla testowych powłok dobrze opisują wartości sił wewnętrznych niezależnie od rozmiarów. Do dalszych analiz można przyjmować elementy o proporcji wymiarów boków w zakresie $1 \div 2-4$.

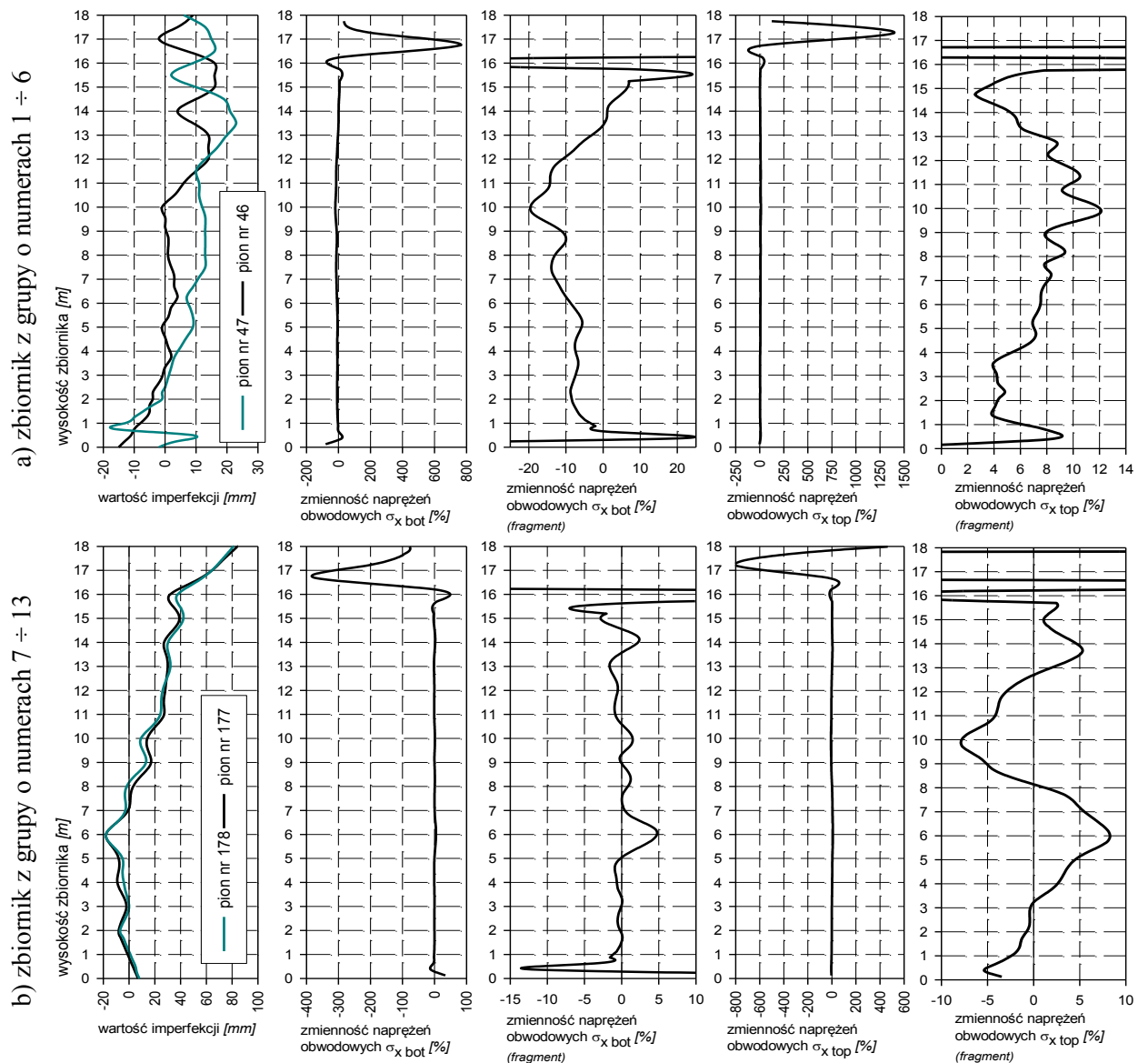
9.3. Powłoki rzeczywistych zbiorników

Analizę zmienności rozkładu sił wewnętrznych oraz wynikających stąd zmiany rozkładu naprężeń przeprowadzono indywidualnie dla każdego zbiornika. Imperfekcje geometryczne zbiornika oraz ich wpływ na analizowane stany potraktowano globalnie w celu określenia obwiedni poszukiwanych wartości 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 poniżej przedstawiono przykładowe zestawienia rozkładów sił wewnętrznych oraz naprężeń dla dwóch losowo wybranych zbiorników. Wyboru dokonano z wcześniej już wspomnianych i analizowanych grup zbiorników oznaczonych numerami „1-6” i „7-13”.

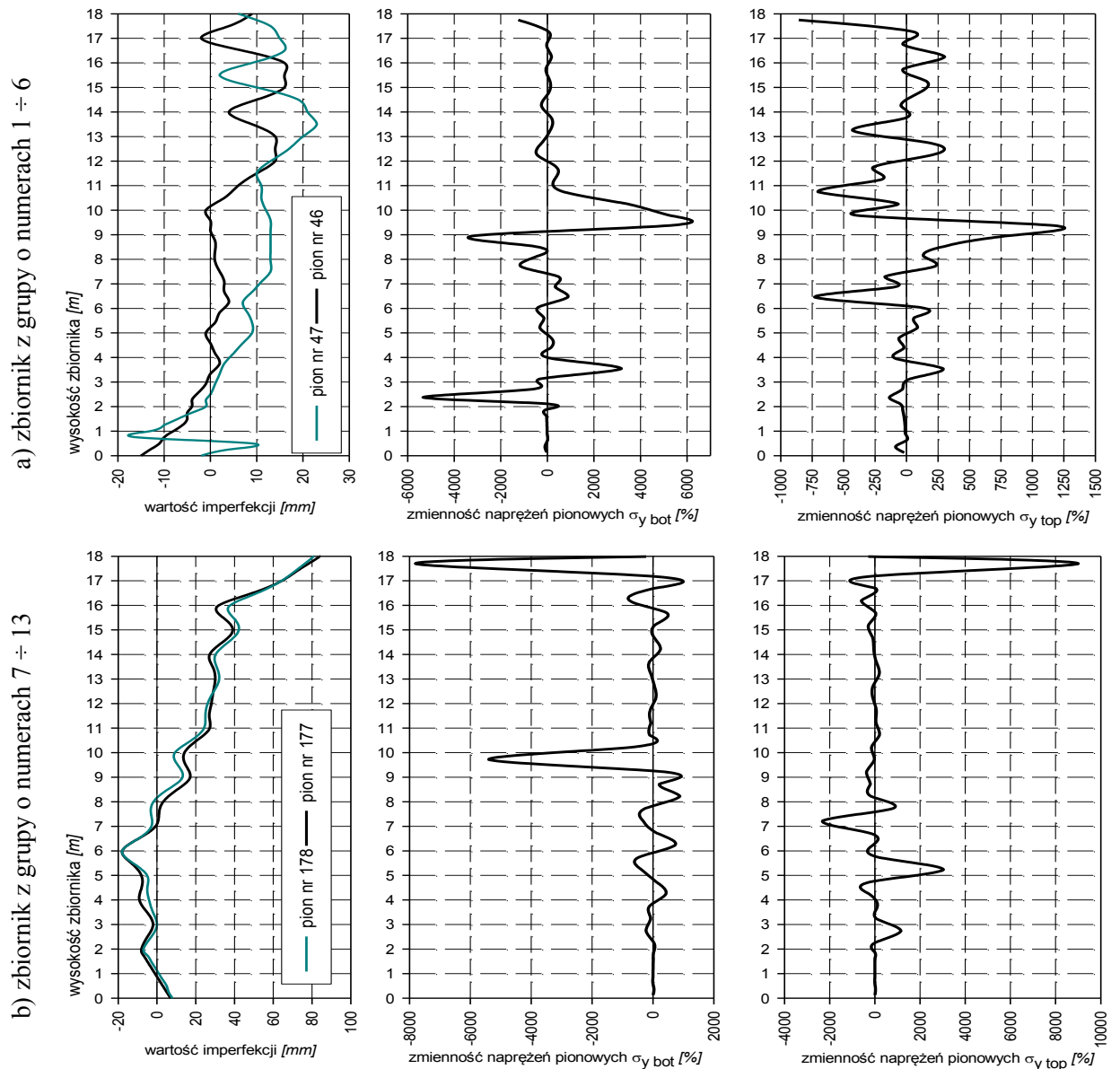


Rys. 9.10. Zakres zmienności siły obwodowej i pionowej dla wybranego pasma elementowego

Również zaprezentowane tu pionowe pasma podziału elementowego płaszczu zbiornika zostały dobrane w sposób losowy. W celu uchwycenia szczegółów zmienności analizowanych rozkładów niektóre wielkości statyczne lub wytrzymałościowe zostały przedstawione na dwóch wykresach. Na jednym przedstawiono cały zakres zmienności prezentowanej wielkości, niejednokrotnie w skali logarytmicznej, zaś na sąsiednim, pewien jego mały fragment o znacznie zawężonej skali poziomej. Takie zestawienie pozwala na zobrazowanie zmienności analizowanych wielkości w układzie całego ich zakresu jak i wybranych fragmentów, które są słabo przedstawione na pełnym wykresie. Stan deformacji powłoki odpowiadający warunkom geometrycznym na krawędziach pionowych wybranego pionowego pasma elementowego został przedstawiony przy każdej analizowanej wielkości statycznej. Krzywa koloru czarnego tego wykresu przedstawia warunki początkowe, zaś druga końcowe brzegowe warunki geometryczne siatki podziału elementowego wybranego pasma.



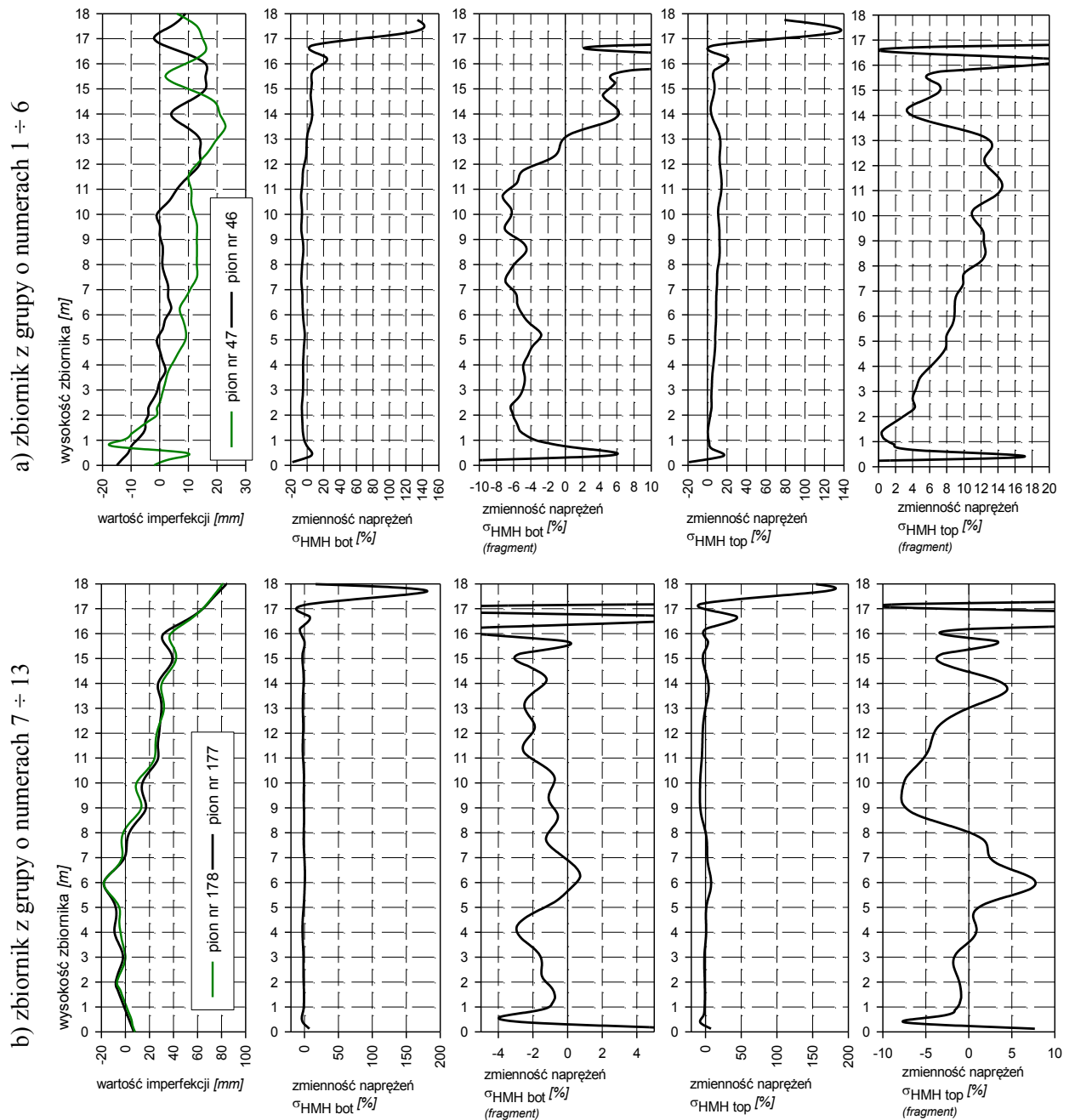
Rys. 9.11. Zakres zmienności naprężeń obwodowych dla wybranego pasma elementowego



Rys. 9.12. Zakres zmienności naprężeń pionowych dla wybranego pasma elementowego

Już na przykładzie powyżej przedstawionych wykresów można stwierdzić, iż trudno jest podać jednoznaczne kryteria zmienności w rozkładach sił wewnętrznych oraz naprężeń na obu powierzchniach powłoki. W przypadku podstawowej dla zbiornika siły obwodowej, w zaprezentowanych przypadkach, na zasadniczej części powłoki zmienność mieści się w zakresie od -4 do 6% (rys. 9.10). Zmienność naprężeń obwodowych (rys. 9.11) jest znacznie większa i wynosi od -20 do 12% i to dla powłoki o mniejszych deformacjach. Dla drugiej prezentowanej powłoki choć o deformacjach kilkukrotnie większych zmienność tych naprężeń jest mniejsza i wynosi od -8 do 8% w stosunku do naprężeń wzorcowych. Charakter naprężeń złożonych wg hipotezy H-M-H (rys. 9.13) pokazuje podobne zmiany jak opisano dla naprężeń obwodowych. Odrębnego komentarza wymagają miejsca gdzie mamy do czynienia z zaburzeniami spowodowanymi dodatkową sztywnością poprzeczną do powłoki zarówno

w postaci dna jak i stężenia wiatrowego w postaci pierścienia. Wartości zmian są w tych miejscach wielokrotnie większe, szczególnie dotyczy to rejonu pierścienia wiatrowego.



Rys. 9.13. Zakres zmienności naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa dla wybranego pasma elementowego

Stan zmienności sił wewnętrznych jak i naprężeń w powłokach płaszczu zbiorników z imperfekcjami geometrycznymi, przy obciążeniu ich wodą, dla każdego analizowanego zbiornika, został przedstawiony na mapach rozkładu zamieszczonych w załączniku numer 5 do niniejszej pracy. Również w tym załączniku podano zestawienia obwodni zmienności sił wewnętrznych i naprężeń. Szczegółowe wyniki zmienności sił wewnętrznych oraz naprężeń dla przykładowego zbiornika zostały podane w załączniku numer 6.

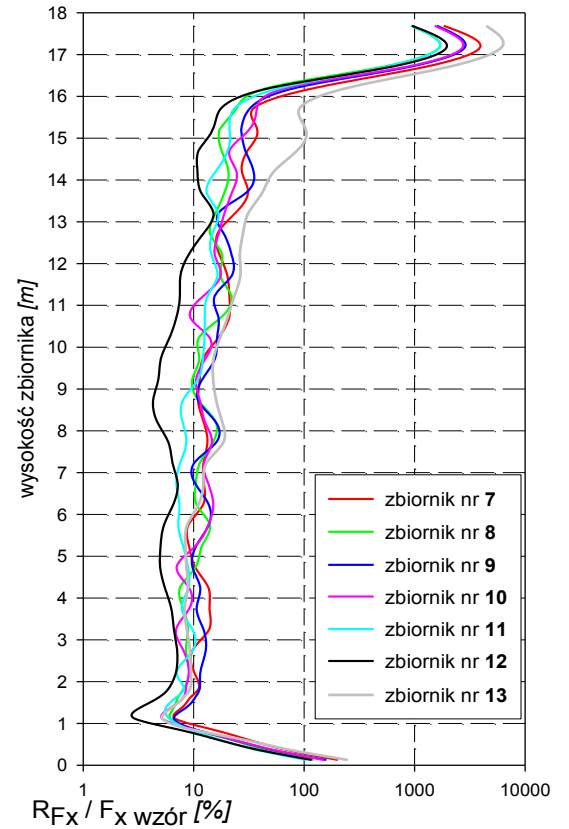
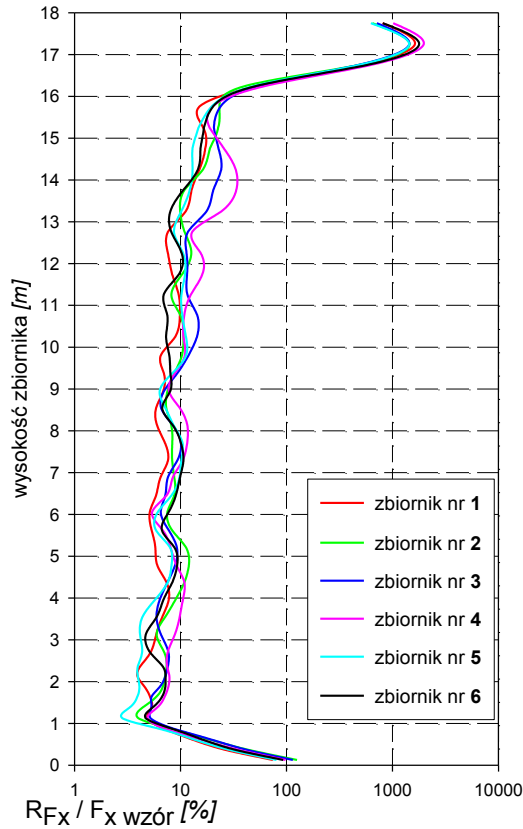
Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 98
--	--	----------------------------

Na kolejnych stronach przedstawiono analizę zakresu zmienności R analizowanych wielkości dla poszczególnych zbiorników. Poniższe wykresy opracowano w oparciu o różnicę wartości maksymalnych i minimalnych z obwiedni poszczególnych wielkości, w stosunku do wartości wzorcowej wg wzoru :

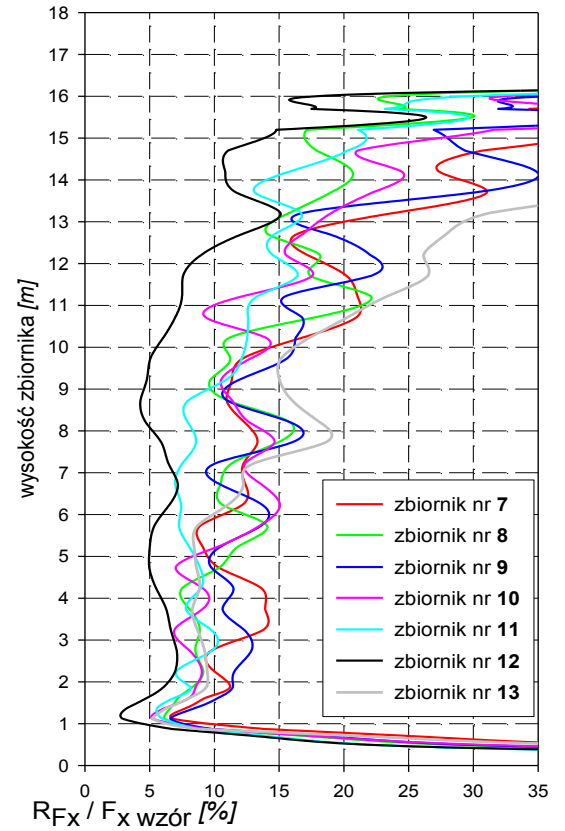
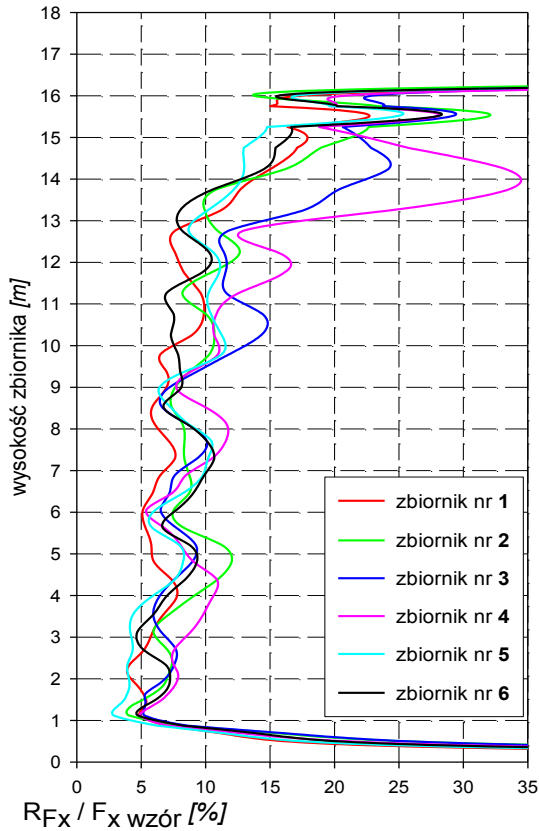
$$\frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\text{wzór}}} \cdot 100\% \quad (9-1)$$

gdzie:

- X_{\min}, X_{\max} – jest odpowiednio minimalną i maksymalną wartością analizowanej wielkości statycznej określonej dla każdego zbiornika na poszczególnych poziomach obliczeniowych (zał. 5),
- $X_{\text{wzór}}$ – jest wielkością wzorcową określoną dla zbiornika bez imperfekcji geometrycznych na poszczególnych poziomach obliczeniowych (zał. 5)
- X – przyjmuje oznaczenia sił wewnętrznych i naprężeń: $F_x, F_y, Q_y, M_y, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_{\text{HMH}}$,
- top, bot – odpowiednio: powierzchnia wewnętrzna, zewnętrzna płaszcza zbiornika

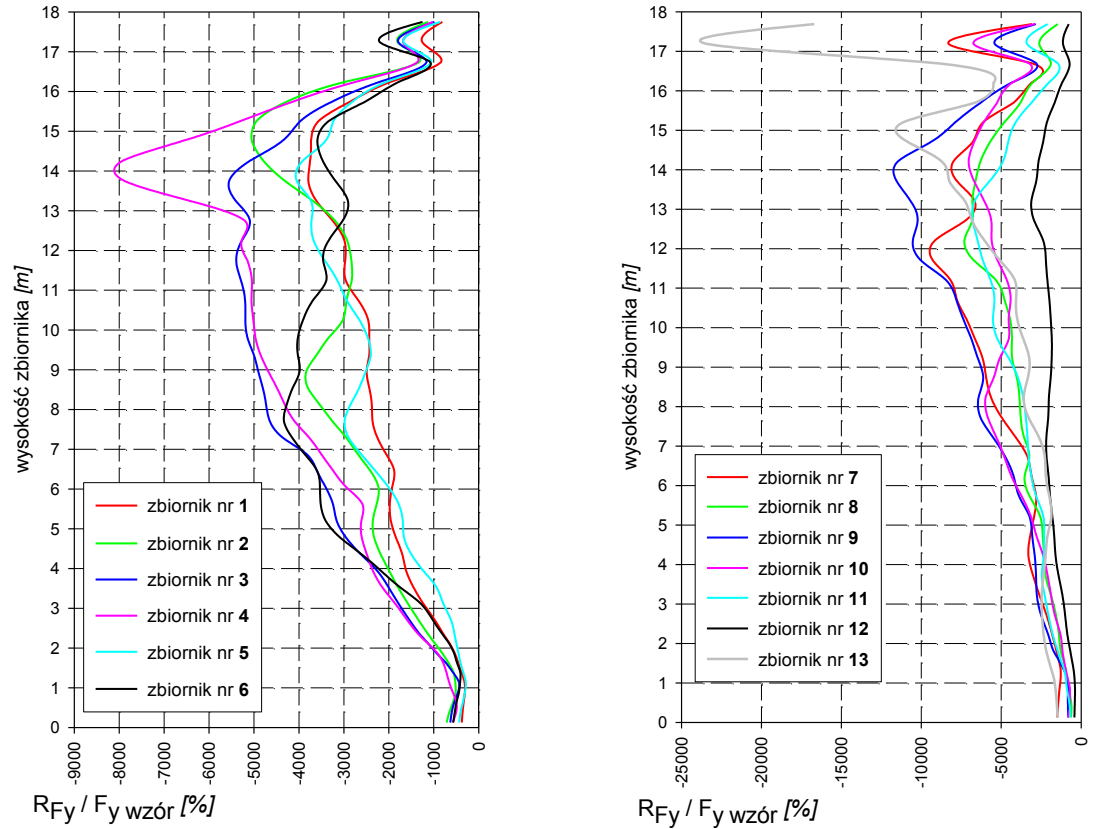


a) w skali logarytmicznej

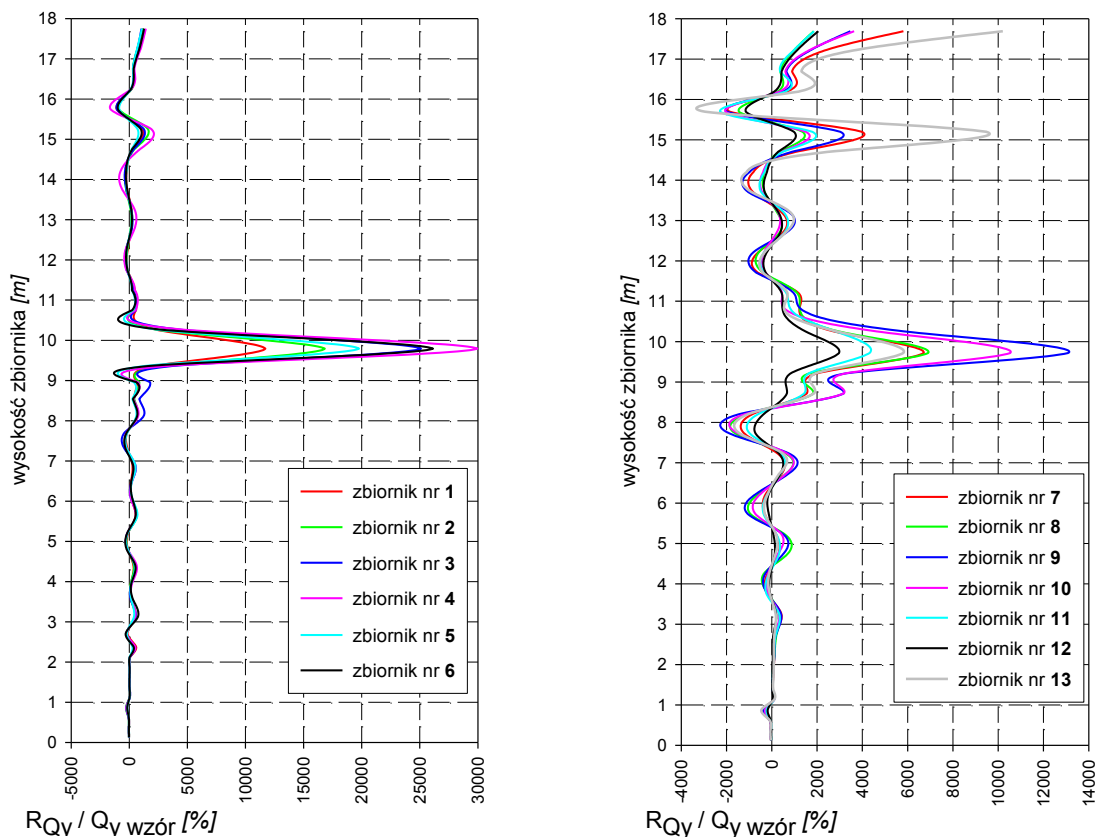


b) w skali liniowej (fragment)

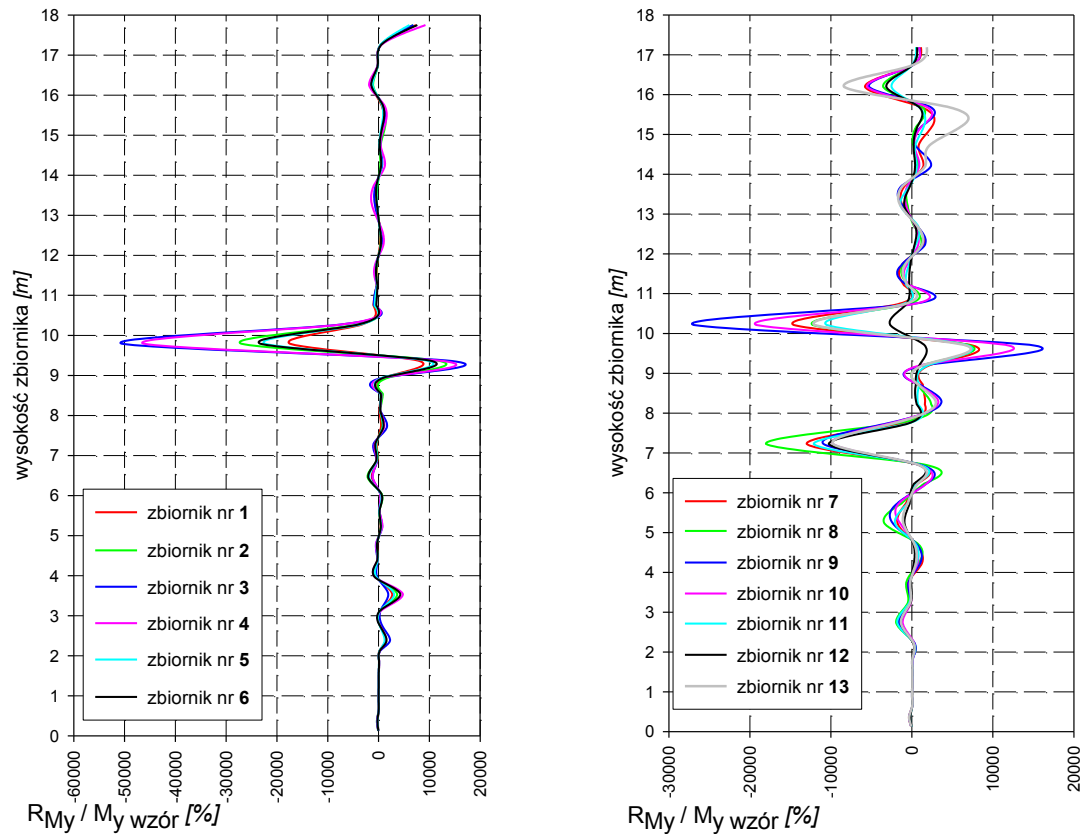
Rys. 9.14. Zakres zmienności siły obwodowej



Rys. 9.15. Zakres zmienności siły pionowej



Rys. 9.16. Zakres zmienności siły tnącej



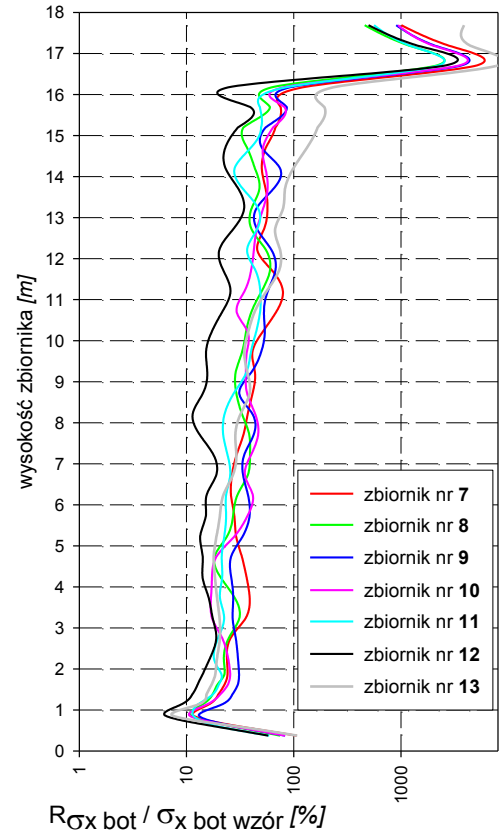
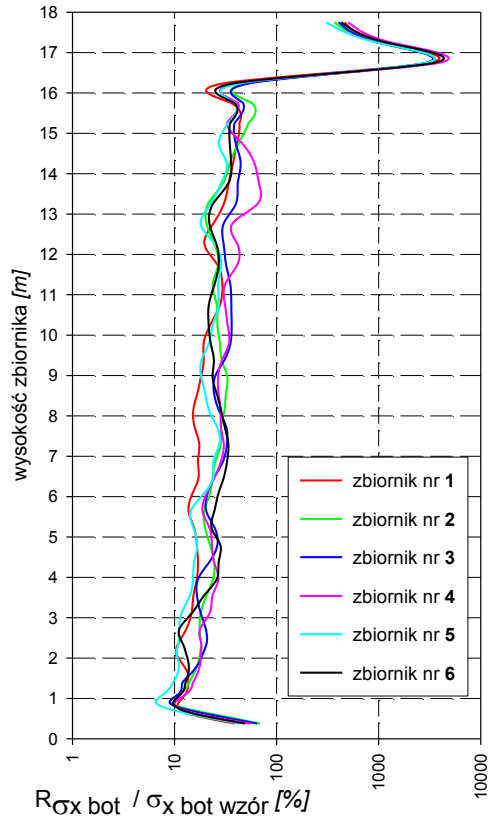
Rys. 9.17. Zakres zmienności momentu zginającego

Prezentowane wartości sił wewnętrznych oraz naprężeń określone zostały dla blach płaszcza zbiornika o grubości uwzględniającej dwu milimetrowy naddatek korozyjny.

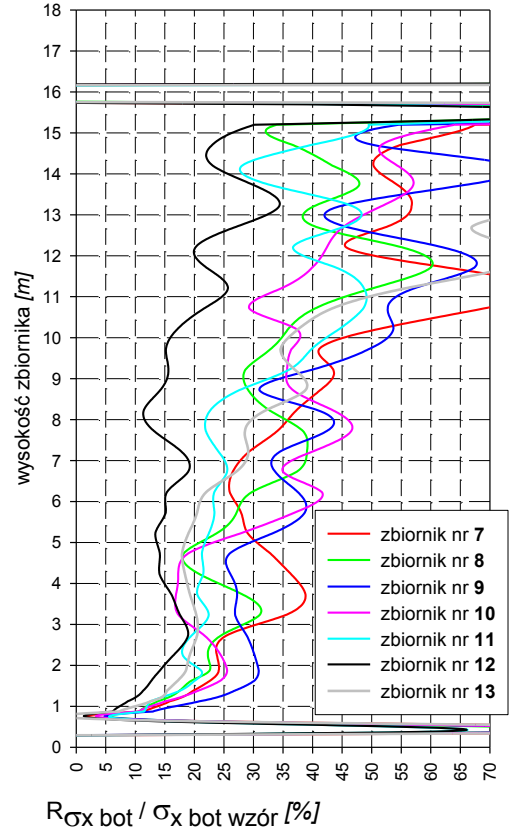
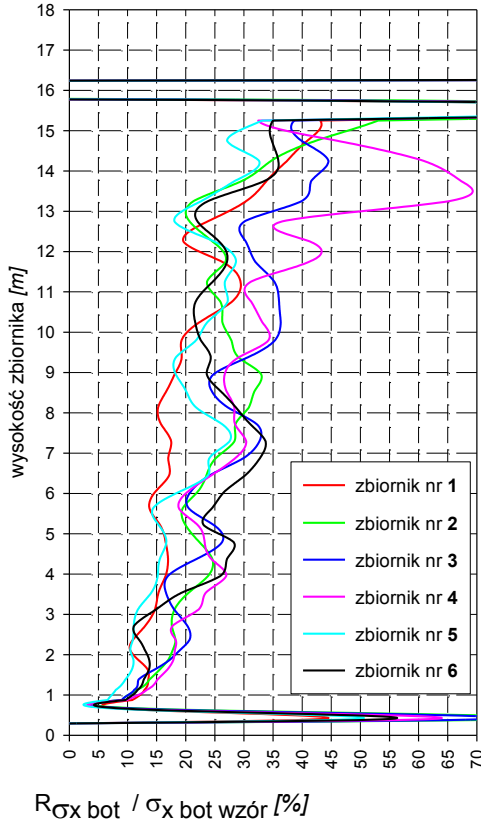
Analiza wcześniej przedstawionych wykresów procentowej zmienności podstawowych sił wewnętrznych pozwala na określenie występującego w konstrukcji z imperfekcjami geometrycznymi rozrzutu wartości, który prezentuje poniższa tablica. Wartości tu podane określono dla zasadniczej części pokrywania się obszarów prezentowanych przebiegów zmienności poszczególnych wielkości.

Tablica 9.14. Zakresy zmienności wielkości sił wewnętrznych

Wielkość statyczna lub naprężenie	Procentowy zakres zmienności dla zbiorników z grupy o numerach	
	„1 – 6”	“7 – 13”
F_x	3 ÷ 25	3 ÷ 30
F_y	-200 ÷ - 5000	-1500 ÷ -10000
M_y	-60 ÷ 100	-80 ÷ 800
Q_y	-70 ÷ 250	-80 ÷ 600

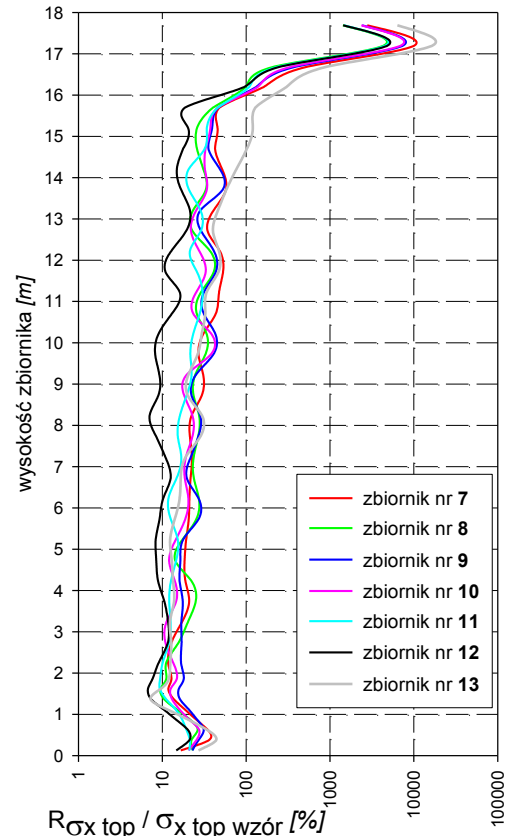
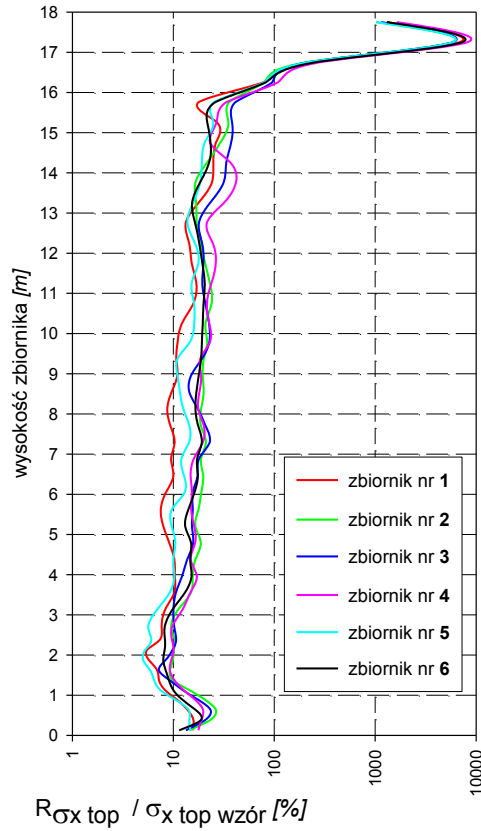


a) w skali logarytmicznej

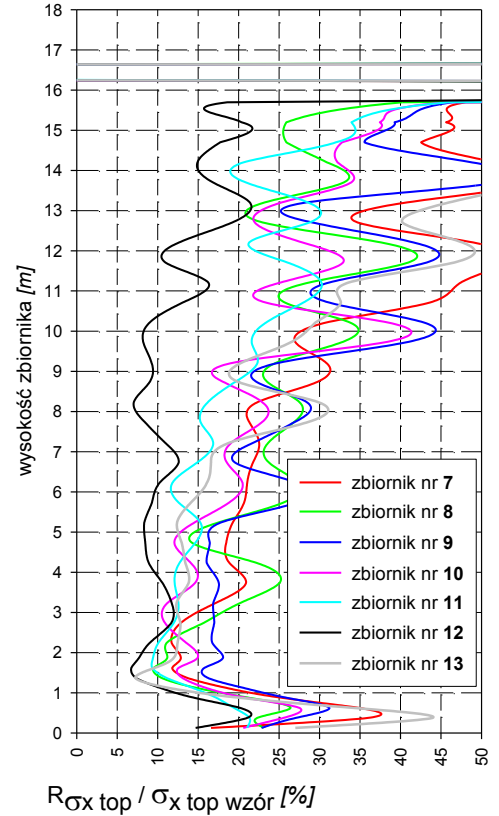
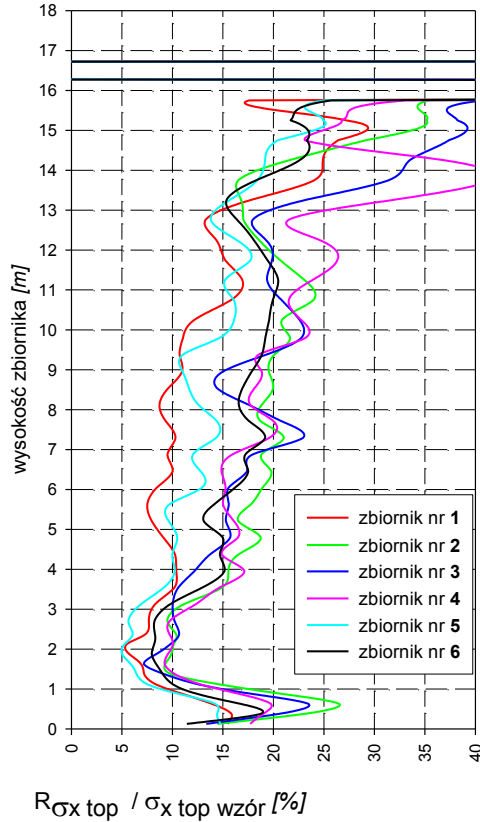


b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.18. Zakres zmienności naprężeń obwodowych - powierzchnia zewnętrzna płaszczu zbiornika

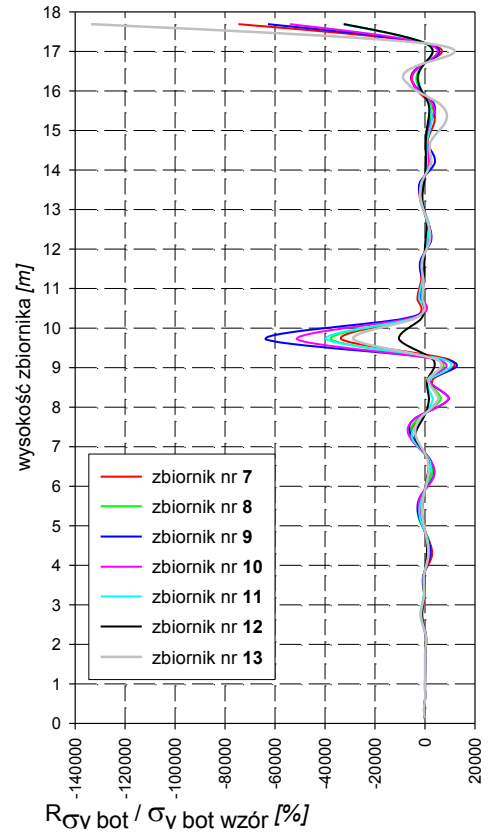
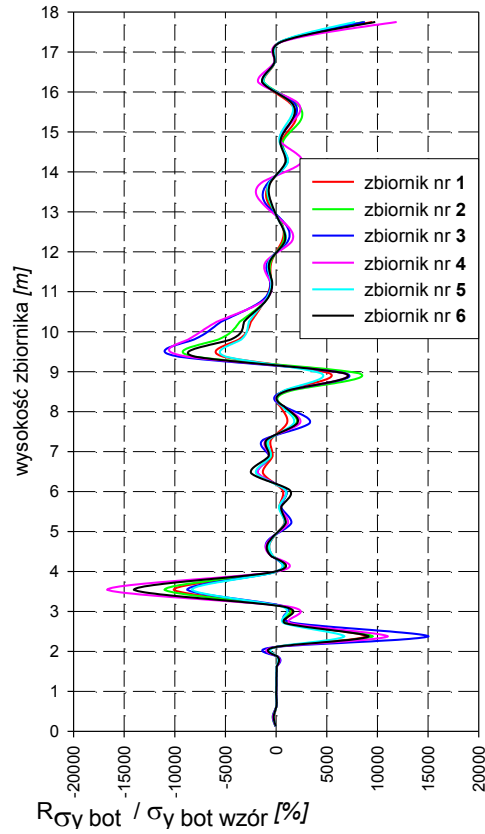


a) w skali logarytmicznej

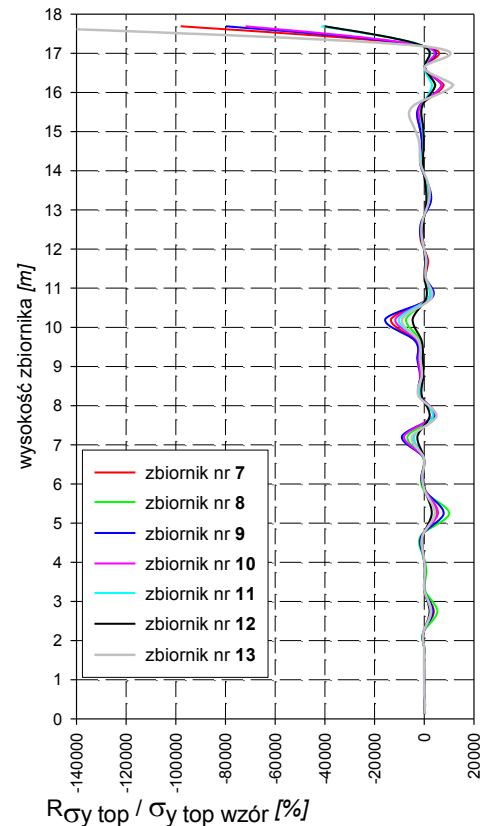
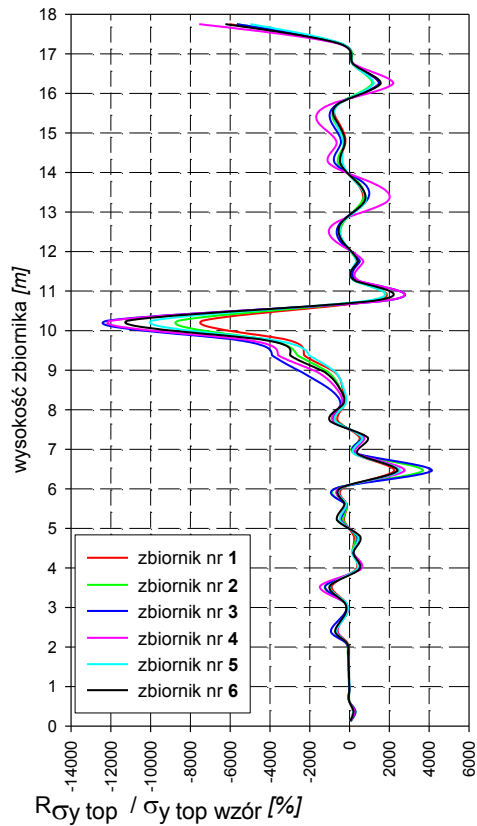


b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.19. Zakres zmienności naprężeń obwodowych – powierzchnia wewnętrzna płaszczu zbiornika

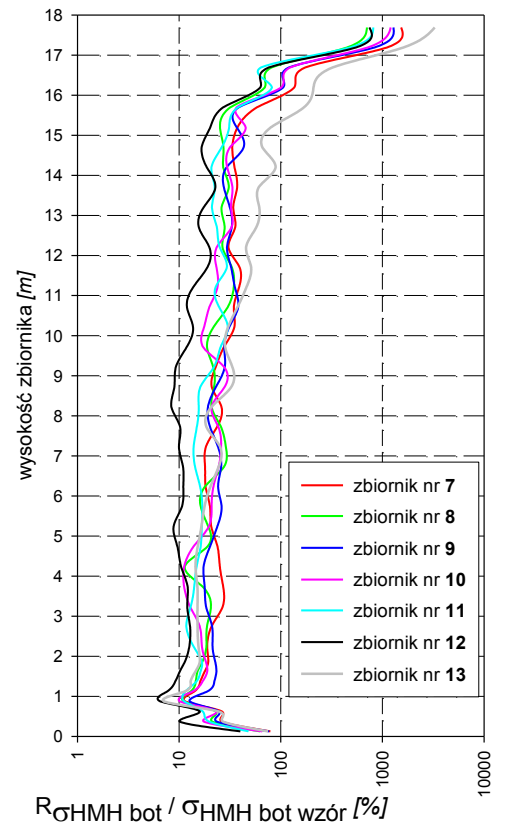
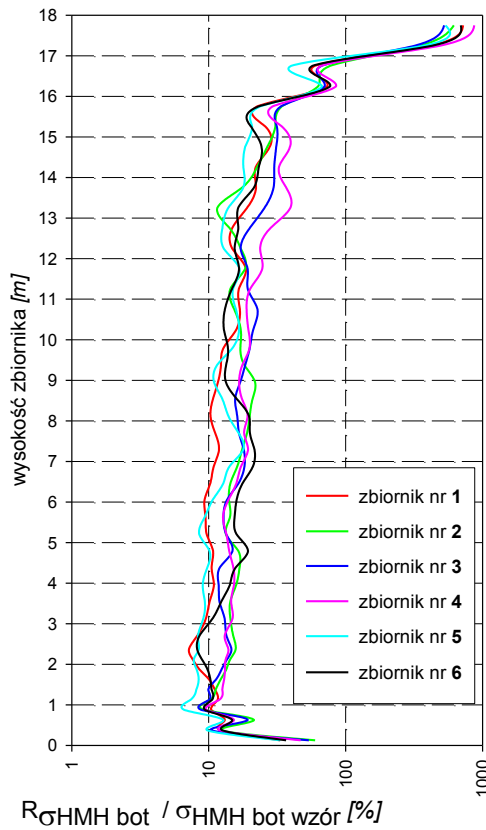


a) na powierzchni zewnętrznej płaszczu zbiornika

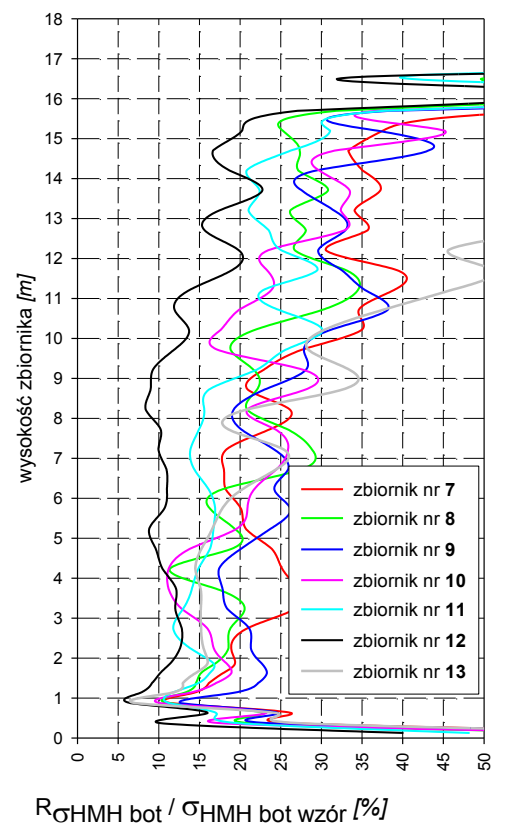
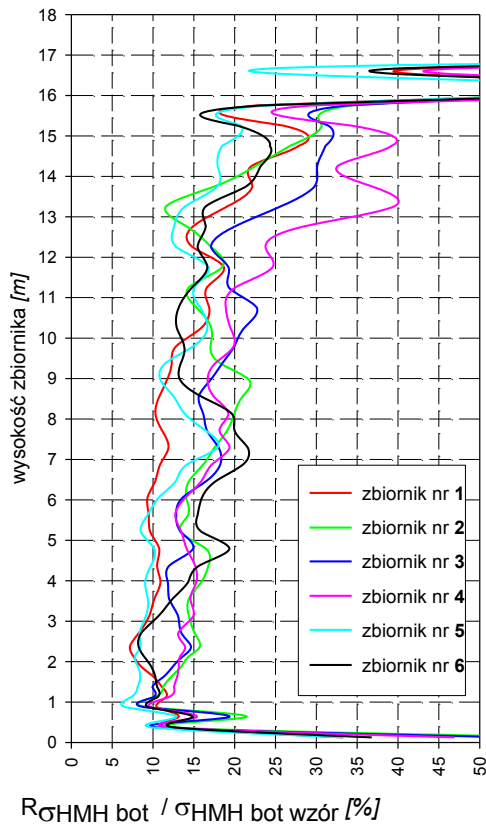


b) na powierzchni wewnętrznej płaszczu zbiornika

Rys. 9.20. Zakres zmienności naprężeń pionowych

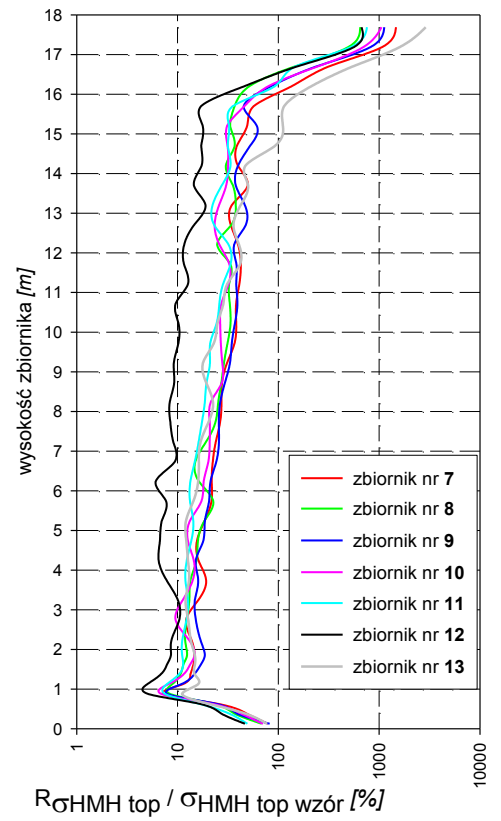
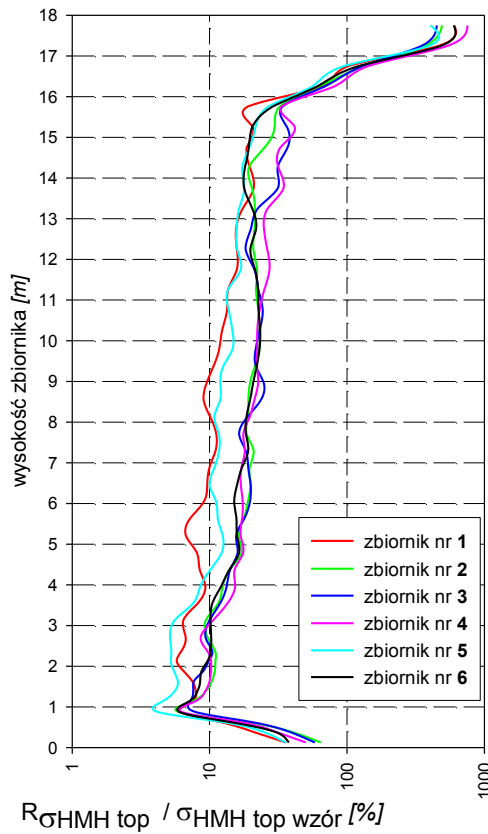


a) w skali logarytmicznej

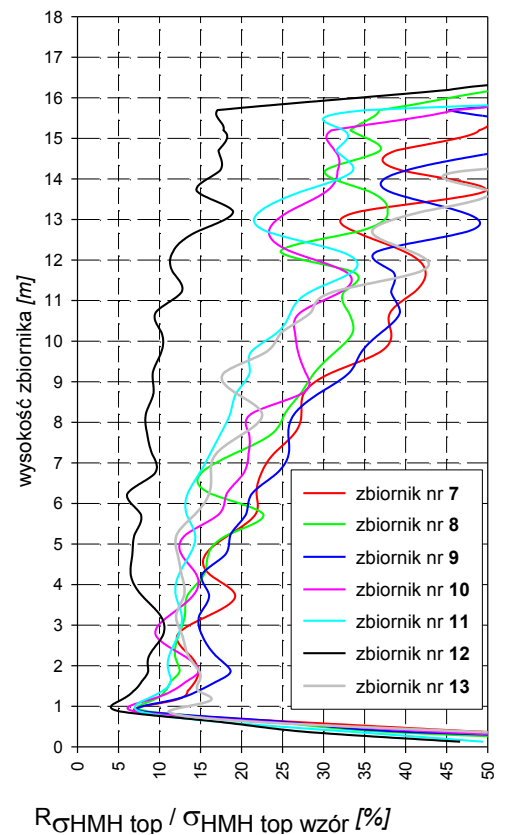
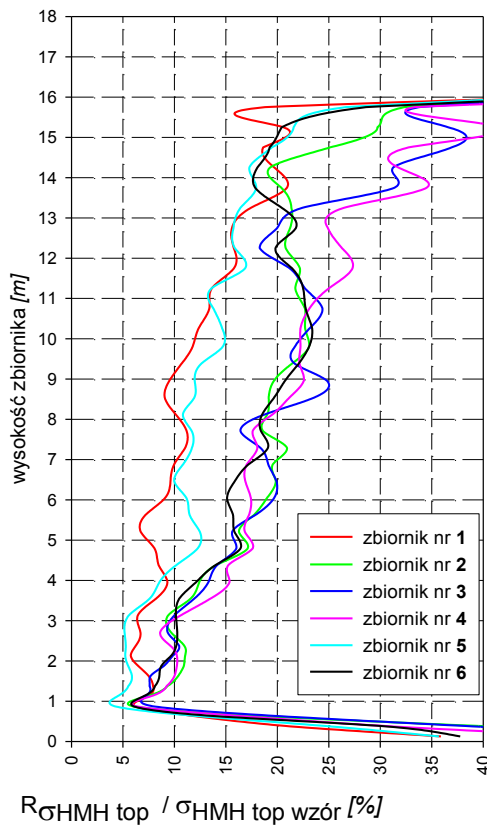


b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.21. Obwiednia zakres zmienności naprężeń zredukowanych wg teorii Hubera-Misesa – na zewnętrznej powierzchni płaszczu zbiornika



c) w skali logarytmicznej



d) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.22. Obwiednia zakres zmienności naprężeń zredukowanych wg teorii Hubera-Misesa – na wewnętrznej powierzchni płaszczu zbiornika

Zaprezentowane powyżej procentowe zakresy zmienności naprężeń jak i zakresy wcześniej podanych sił wewnętrznych można scharakteryzować ogólną tendencją wzrostu ich wartości wraz z wysokością zbiornika. To odpowiada pokazanej tendencji wzrostu zakresów zmienności odchyłek geometrycznych płaszczu wraz ze wzrostem jego wysokości. Cechę tę opisano w części statystycznej niniejszej pracy. Podobnie jak dla prezentowanych wcześniej wybranych, pojedynczych pionów tak i na powyższych wykresach widoczny jest znaczny wzrost zmienności analizowanych wartości w części przyległej do dna zbiornika oraz pierścienia wiatrowego. W miejscach tych mamy do czynienia ze znacznym wpływem imperfekcji na stan zaburzeń brzegowych wywołanych dodatkową sztywnością wspomnianych elementów. Pomijając te fragmenty zaburzeń można podać, iż w zakresie gdzie płaszcz pracuje jako konstrukcja powłokowa zmienności poszczególnych analizowanych wielkości naprężeń kształtują się w niżej podanych granicach.

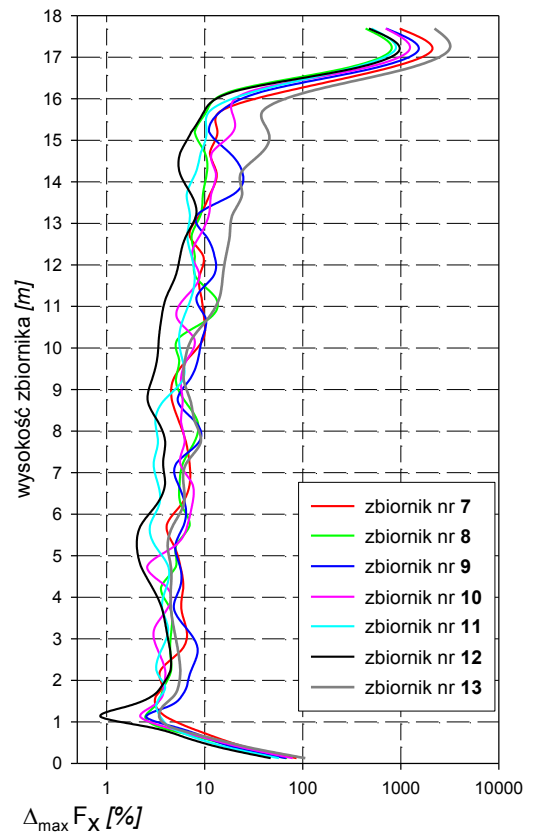
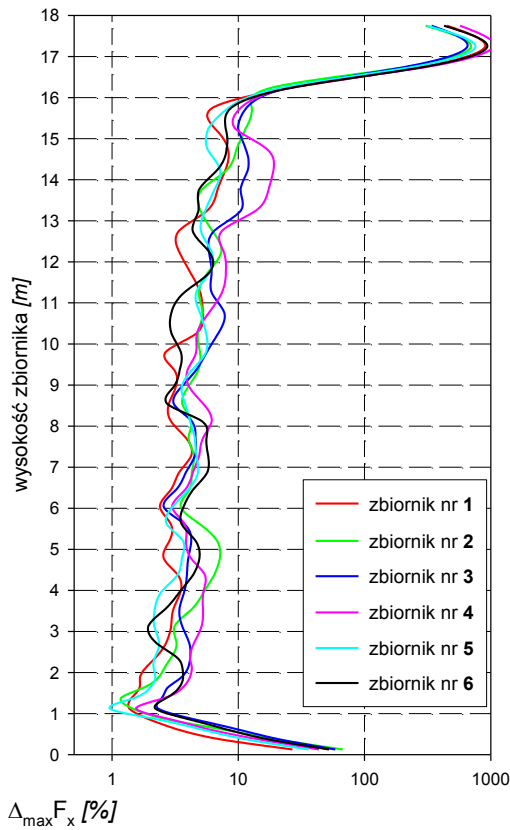
Tablica 9.15. Zakresy zmienności wielkości naprężeń

Wielkość statyczna lub naprężenie	Procentowy zakres zmienności dla zbiorników z grupy o numerach	
	„1 – 6”	“7 – 13”
$\sigma_x \text{ bot}$	5 ÷ 40	2 ÷ 55
$\sigma_x \text{ top}$	5 ÷ 30	7 ÷ 45
$\sigma_y \text{ bot}$	10 ÷ 550	30 ÷ 350
$\sigma_y \text{ top}$	-50 ÷ 450	-30 ÷ 600
$\sigma_{\text{HMH bot}}$	7 ÷ 25	7 ÷ 35
$\sigma_{\text{HMH top}}$	4 ÷ 30	4 ÷ 45

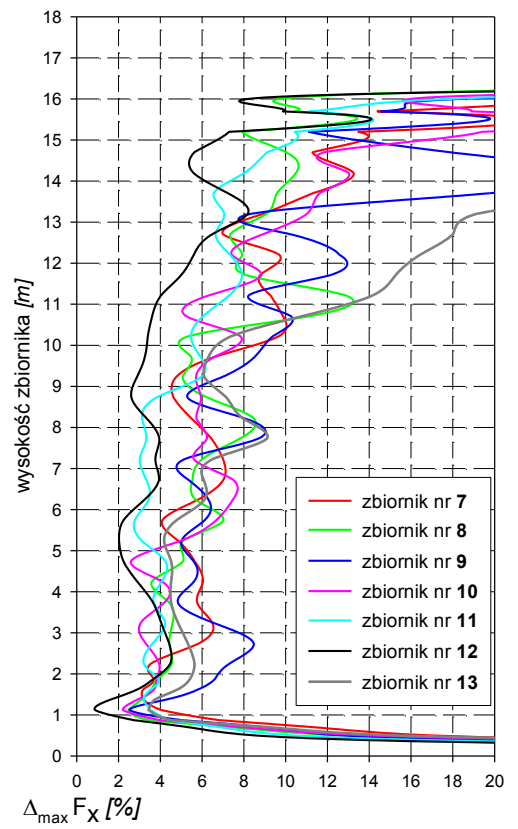
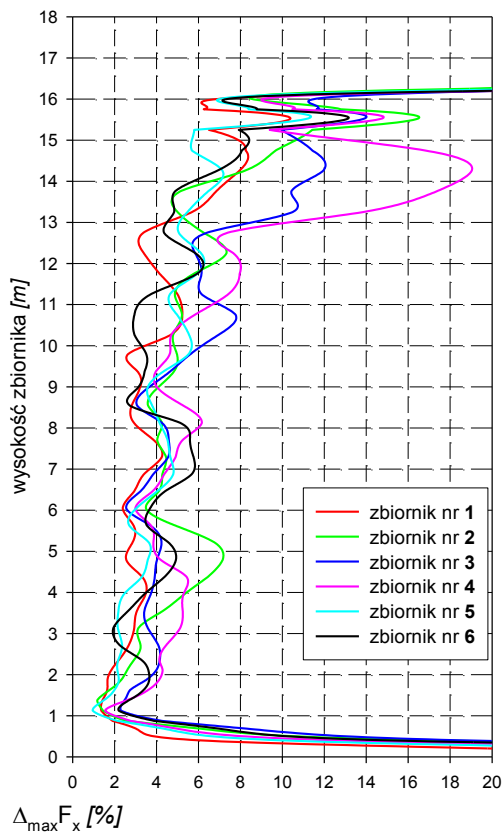
Szczególnie bardzo duże procentowe wartości, sięgające kilkunastu tysięcy, dla niektórych prezentowanych wielkości (np. rys.9.17, 9.20) są wynikiem znikomej wartości wzorcowej (niejednokrotnie bliskiej zeru), służącej do standaryzacji analizowanej wielkości.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji obiektu i rezerwy nośności konstrukcji ważna jest wielkość wzrostu wartości analizowanych sił wewnętrznych oraz naprężeń $\Delta_{\max} X$ (wzór 9-2) ponad poziom naprężeń określonych na podstawie aktualnych norm projektowania. Na następnych stronach przedstawiono odpowiednie zestawienia obrazujące ten problem.

$$\Delta_{\max} X = \frac{X_{\max} - X_{\text{wzór}}}{X_{\text{wzór}}} \cdot 100\% \quad (9-2)$$

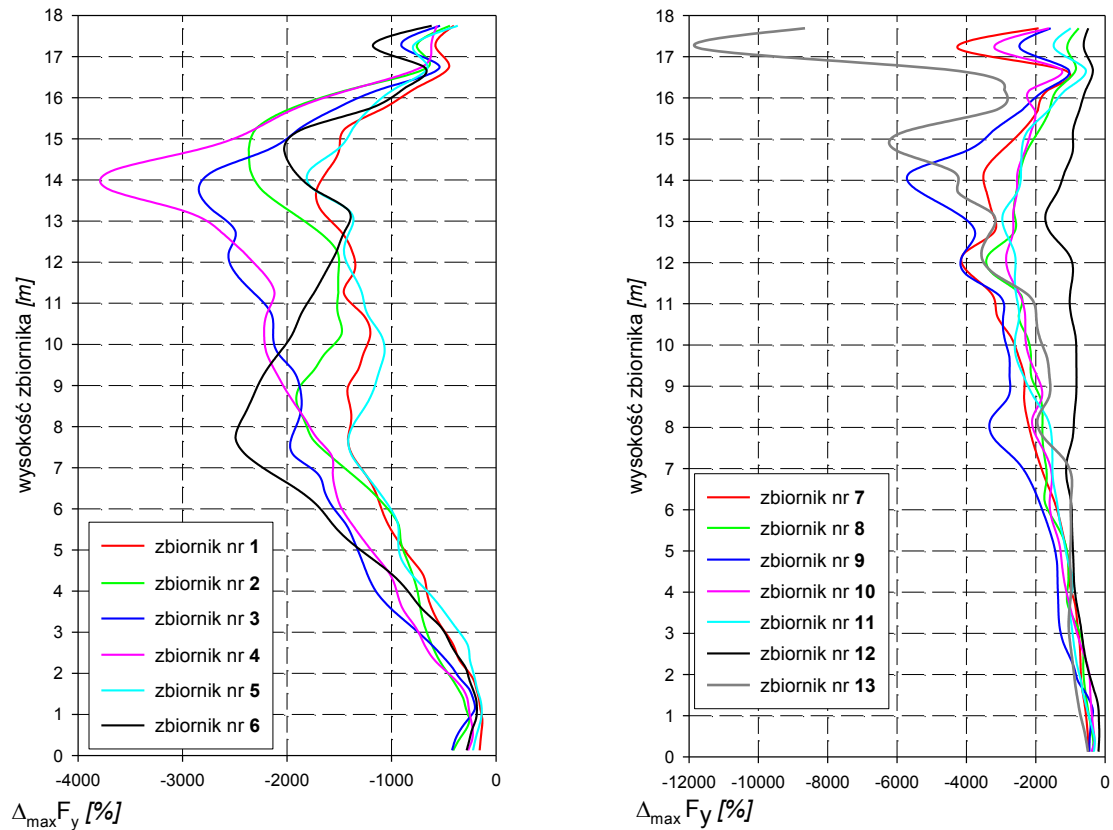


a) w skali logarytmicznej



b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.23. Maksymalny wzrost siły obwodowej



Rys. 9.24. Maksymalny wzrost siły pionowej

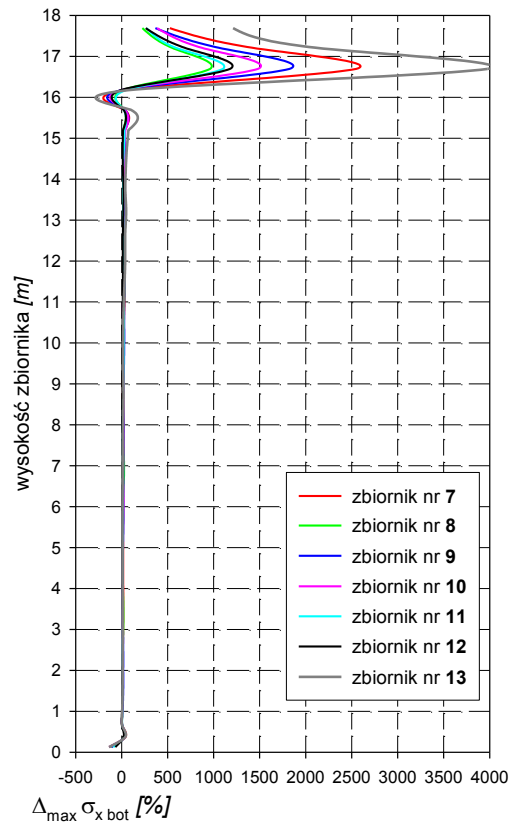
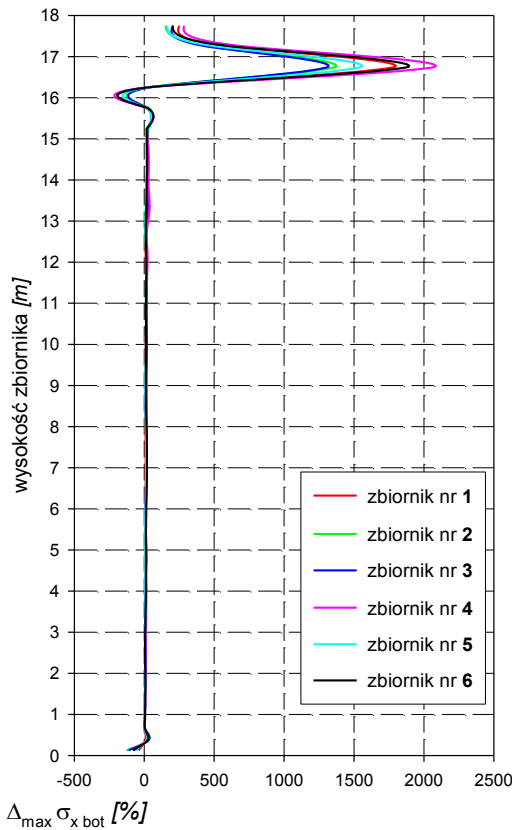
Przedstawione wykresy procentowego wzrostu sił wewnętrznych oraz naprężeń ponad poziom określanych obliczeniowo dla wartości obciążenia charakterystycznego można przedstawić ogólnie w postaci wartości podanych w poniższych tablicach.

Tablica 9.16. Zakresy maksymalnych wzrostów wielkości sił wewnętrznych

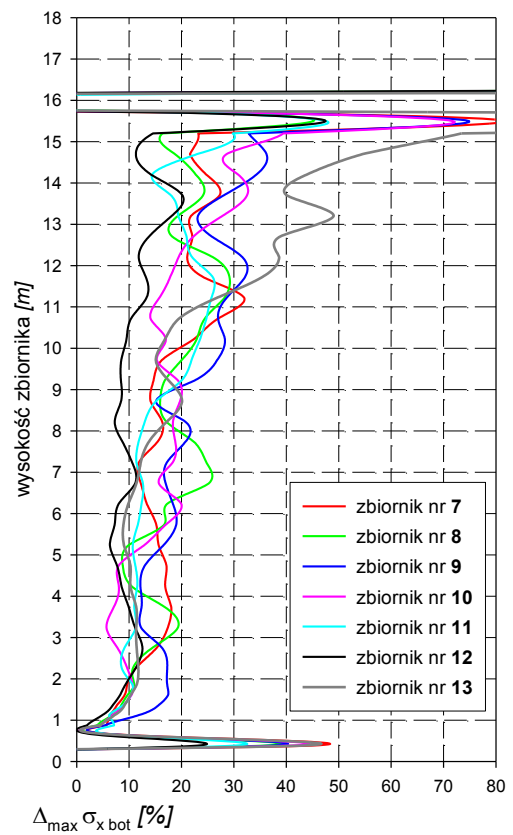
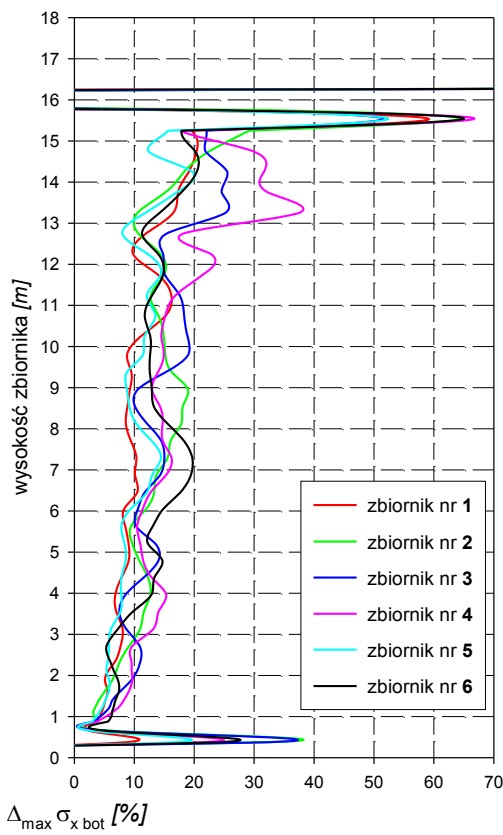
Wielkość statyczna lub naprężenie	Procentowy zakres zmienności dla zbiorników z grupy o numerach	
	„1 – 6”	„7 – 13”
F_x	1 ÷ 8	2 ÷ 12
F_y	-200 ÷ -250	-500 ÷ 4000

Tablica 9.17. Zakresy maksymalnych wzrostów wielkości naprężeń

Wielkość statyczna lub naprężenie	Procentowy zakres zmienności dla zbiorników z grupy o numerach	
	„1 – 6”	„7 – 13”
σ_x bot	2 ÷ 25	0 ÷ 30
σ_x top	3 ÷ 12	3 ÷ 22
σ_{HMH} bot	4 ÷ 15	5 ÷ 20
σ_{HMH} top	2 ÷ 15	5 ÷ 25

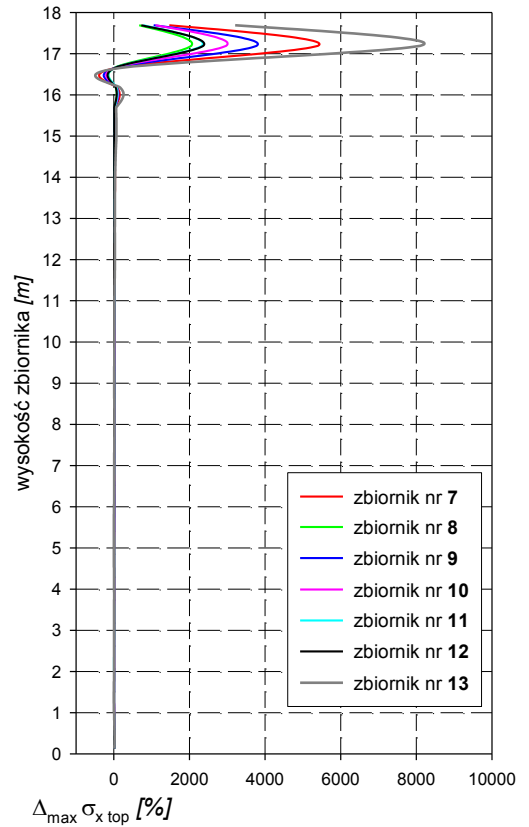
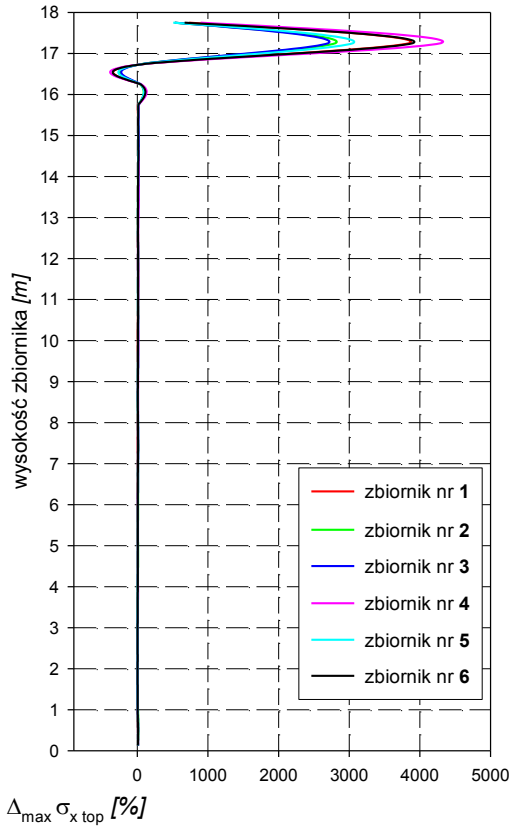


a) w skali liniowej

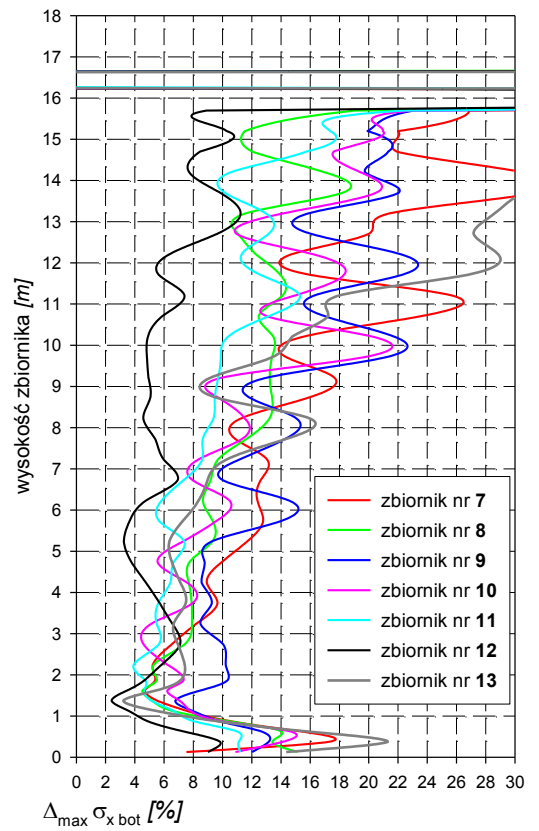
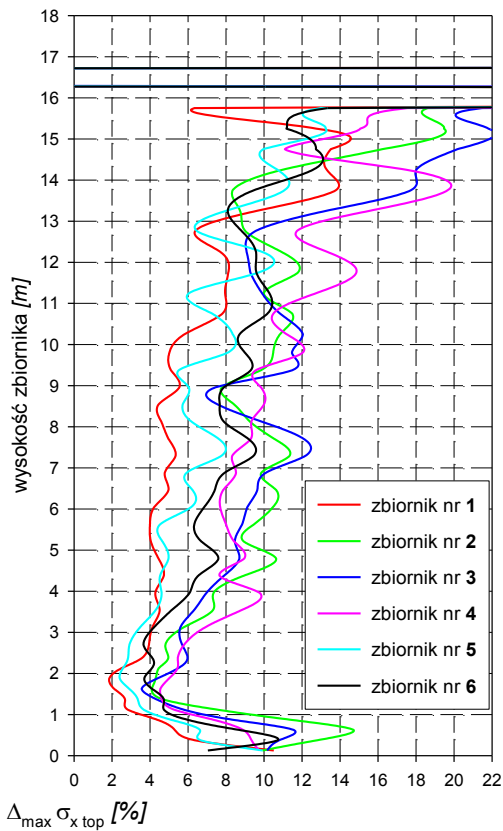


b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.25. Maksymalny wzrost naprężeń obwodowych – powierzchnia zewnętrzna płaszczu zbiornika

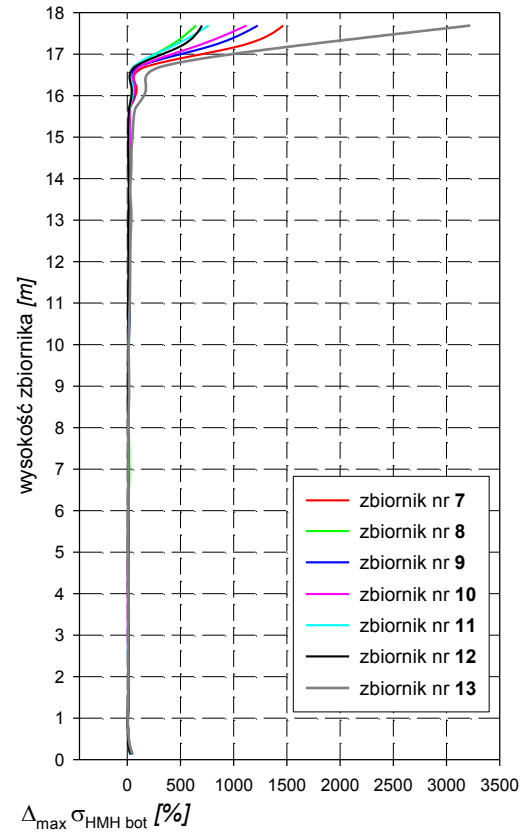
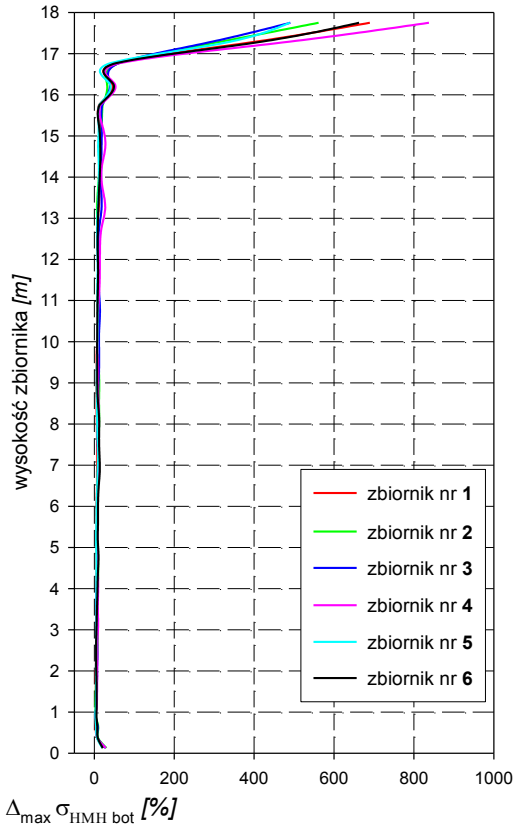


a) w skali liniowej

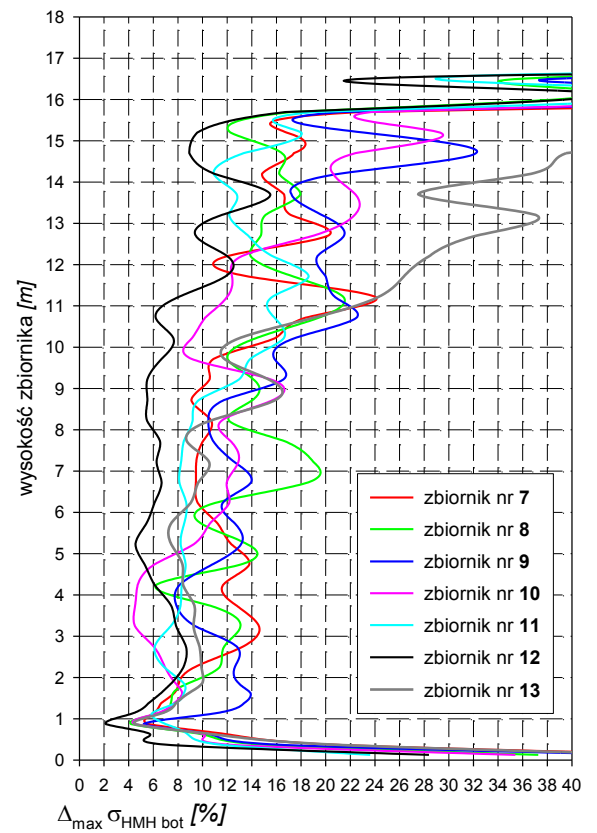
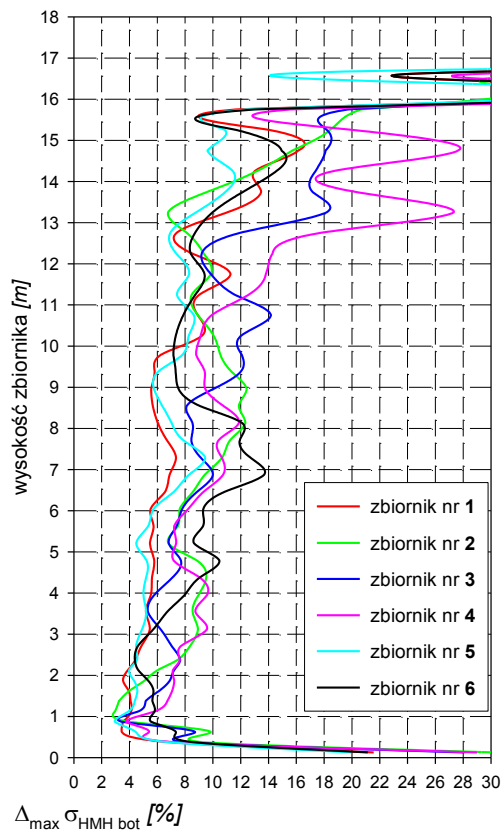


b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.26. Maksymalny wzrost naprężeń obwodowych – powierzchnia wewnętrzna płaszczu zbiornika

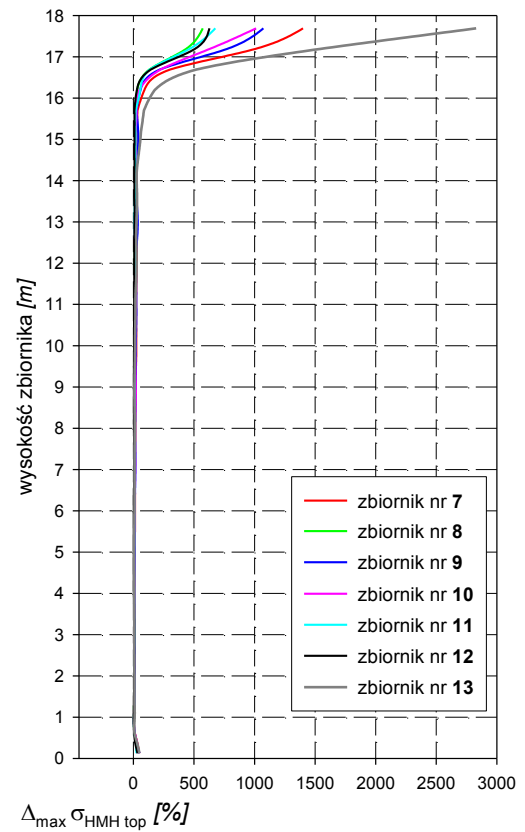
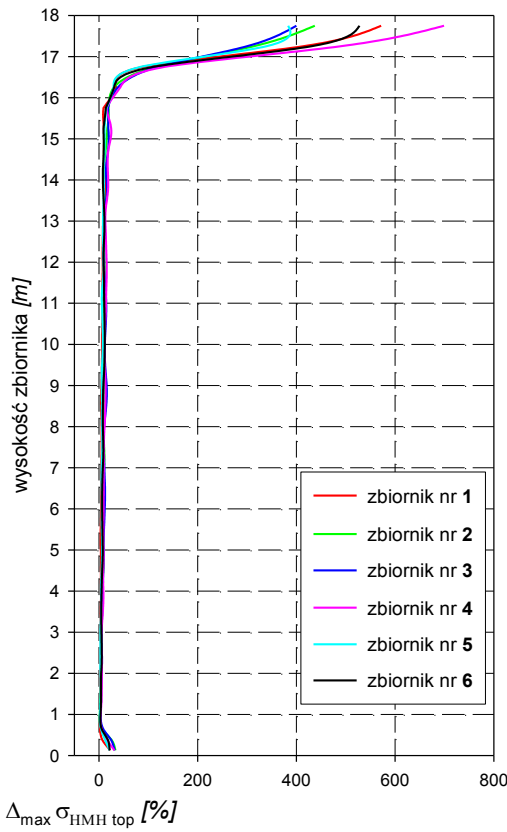


a) w skali liniowej

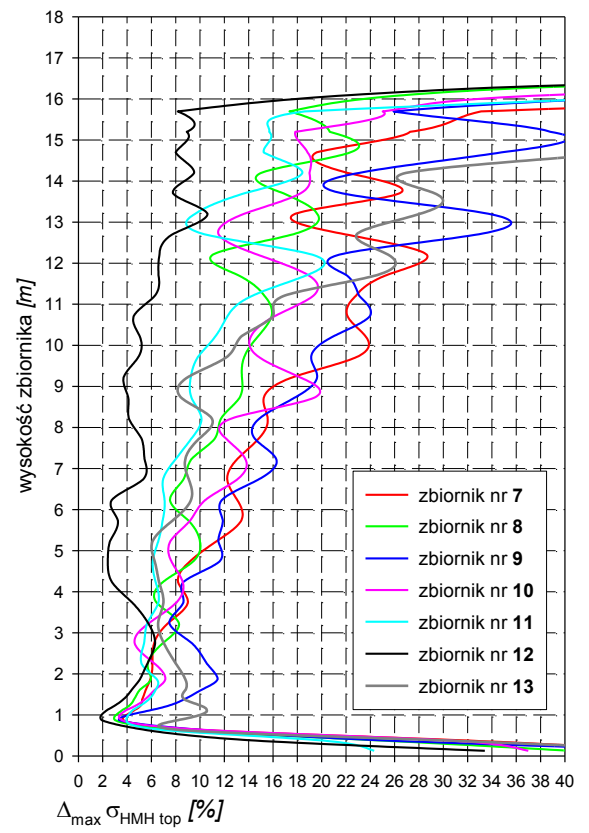
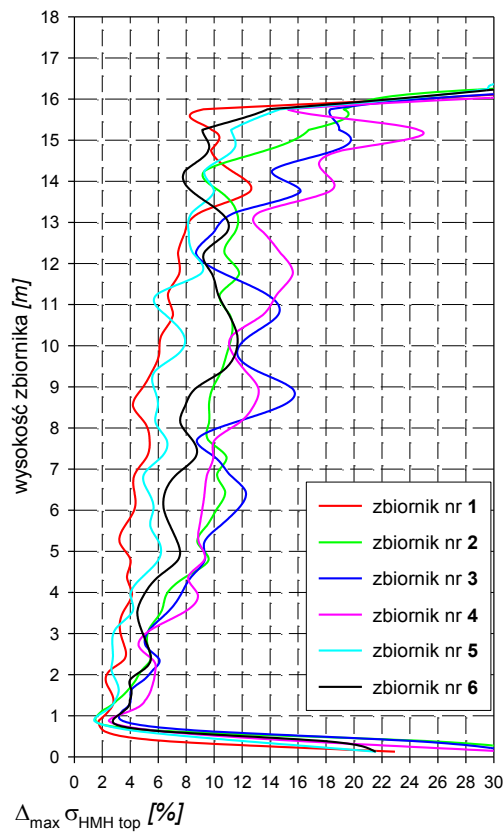


b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.27. Obwiednia maksymalnego wzrostu naprężeń zredukowanych wg teorii Hubera-Misesa – na zewnętrznej powierzchni płaszczu zbiornika



a) w skali liniowej



b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.28. Obwiednia maksymalnego wzrostu naprężeń zredukowanych wg teorii Hubera-Misesa – na wewnętrznej powierzchni płaszczu zbiornika

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 114
--	--	-----------------------------

Przedstawione wcześniej wykresy i zestawienia tabelaryczne pozwalają, podobnie jak wcześniej, na stwierdzenie iż mamy do czynienia ze wzrostem wartości zmienności analizowanych wielkości wraz ze wzrostem wysokości obiektu. Jak można to przeanalizować na podstawie tablic 9.16 i 9.17 wzrosty wartości sił obwodowych, podany tu o wartościach maksymalnym 8-12% nie przekłada się wprost na jednakowy wzrost stanu naprężeń obwodowych jak zredukowanych, który dla naprężeń obwodowych mieści się w granicach 12-25% dla grupy zbiorników oznaczonej numerami „1-6”. Druga grupa zbiorników oznaczona numerami „7-13” charakteryzuje się wzrostem naprężeń obwodowych w zakresie 22-30%. Wzrost naprężeń zredukowanych dla poszczególnych grup wynosi odpowiednio około 15% i 20-25%.

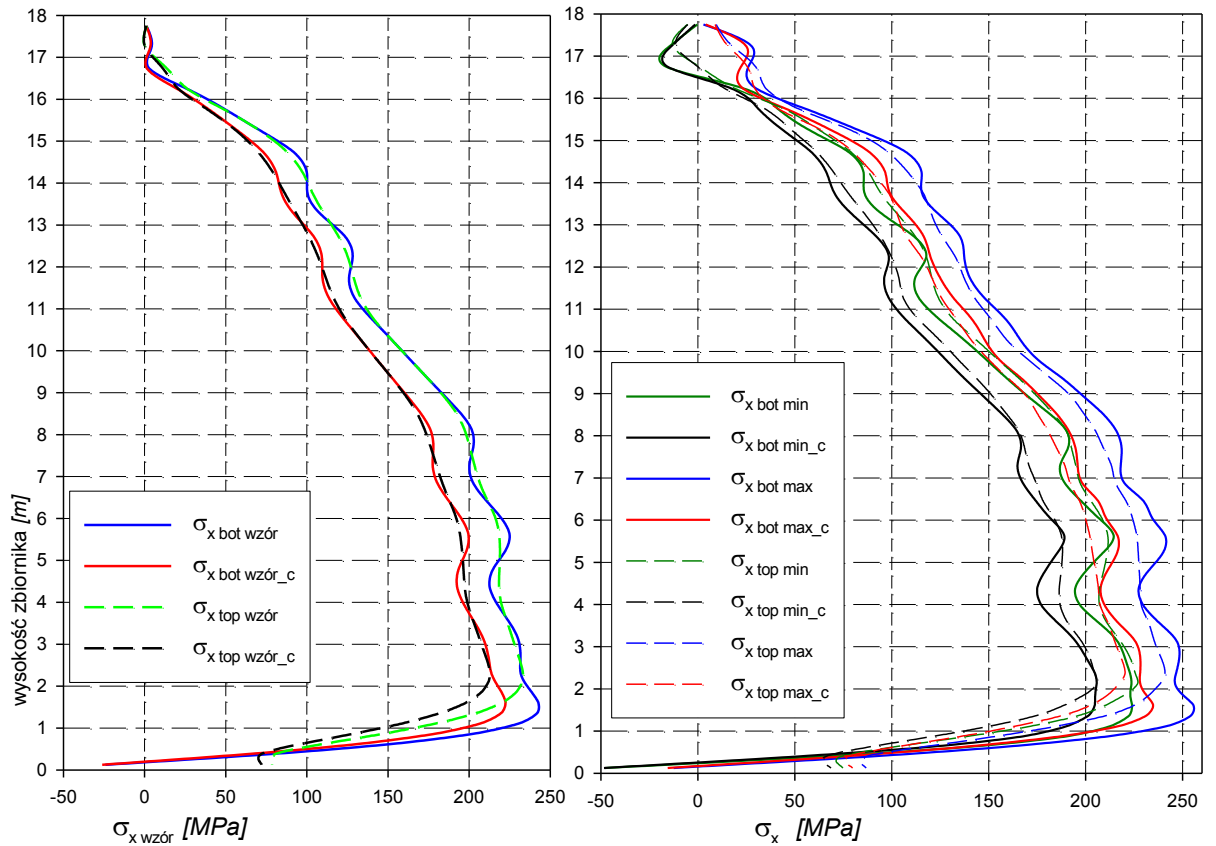
Na kolejnych stronach przedstawiono przykładowe zestawienie wartości naprężeń obwodowych i zredukowanych dla jednego zbiornika z analizowanej grupy oznaczonej numerami „1-6”, które uwzględnia różnice wywołane stosowanym w praktyce nadładkiem grubości blach tworzących konstrukcje zbiornika z uwagi na znaczny czynnik korozyjny oraz przewidywany okres eksploatacji. W pokazanej analizie założono jednakowy ubytek grubości blach stalowej na całej wysokości obiektu. Założono zgodnie z postanowieniami normy 50-cio letni okres eksploatacji oraz średnioroczny, umowny ubytek korozyjny o wartości 0,04 mm/rok, co daje dodatkowe 2 milimetry grubości blach płaszczu zbiornika

Przyjęte na wykresach opisy są zgodne z wcześniejszymi i oznaczają:

- bot – stronę zewnętrzną płaszczu zbiornika,
- top – stronę wewnętrzną płaszczu zbiornika,

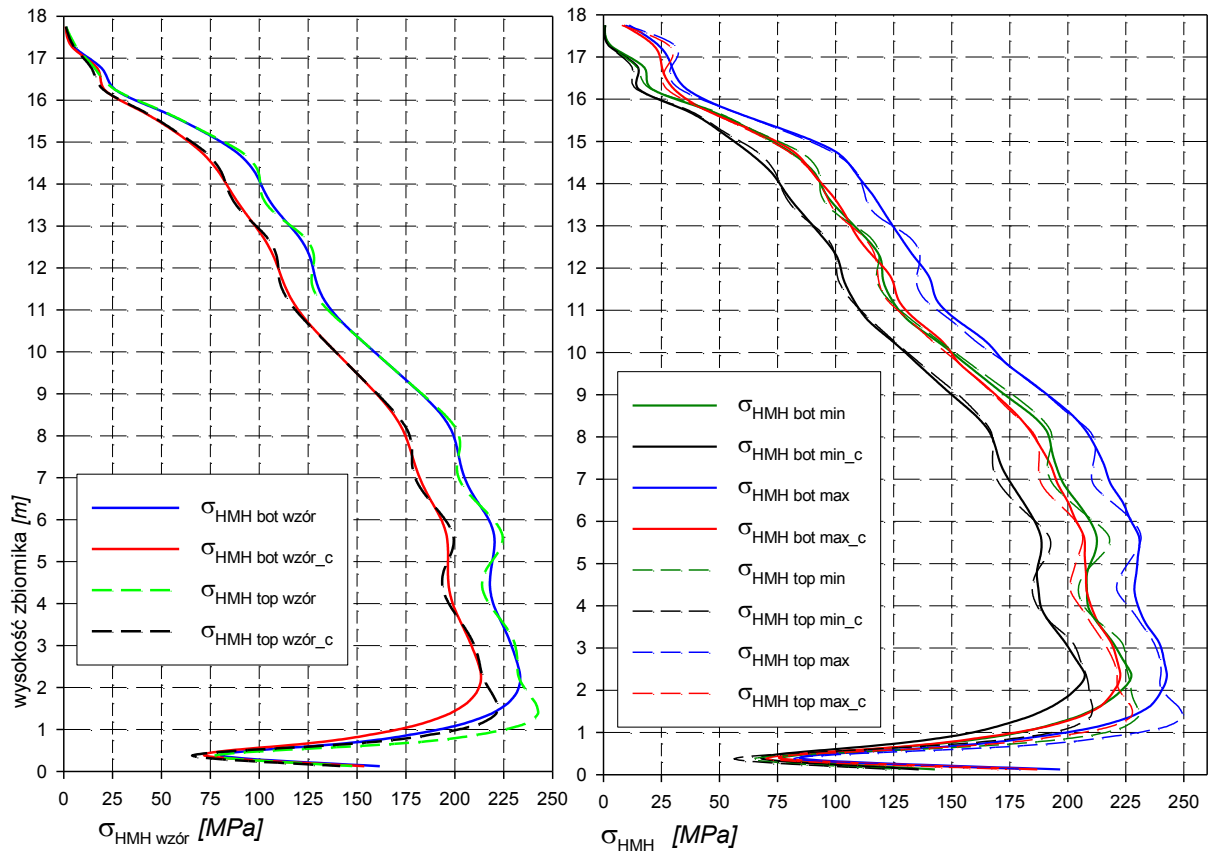
wielkości z dodatkowym indeksem c oznaczają uwzględnienie w obliczeniach wartości nadładku korozyjnego.

Jak można zobaczyć na dalej podanych wykresach wraz ze zmianą grubości blach płaszczu zbiornika następuje wzrost wartości naprężeń, który na zasadniczej części, dla obu przedstawionych wartości wzorcowych naprężeń wynosi około 25 MPa. Również przedstawione obwiednie zmienności tych naprężeń dla konstrukcji z imperfekcjami kształtu wskazują na podobnej wielkości rozrzut wartości. Z analizy zakresu zmienności obwiedni naprężeń dla konstrukcji z imperfekcjami geometrycznymi można stwierdzić, iż zakres zmian naprężeń w płaszczu zbiornika uwzględniający imperfekcje powłoki oraz ubytki korozyjne w czasie eksploatacji osiąga, w miejscach najbardziej wyężonych, wartości około 50 MPa, co stanowi 20-25% zmianę stanu naprężenia w zależności od poziomu odniesienia – do stanu naprężeń z nadładkiem korozyjnym czy też bez niego.



a) zmienność naprężeń obwodowych dla konstrukcji idealnej

b) obwodnie zmienność naprężeń obwodowych dla konstrukcji z imperfekcjami kształtu



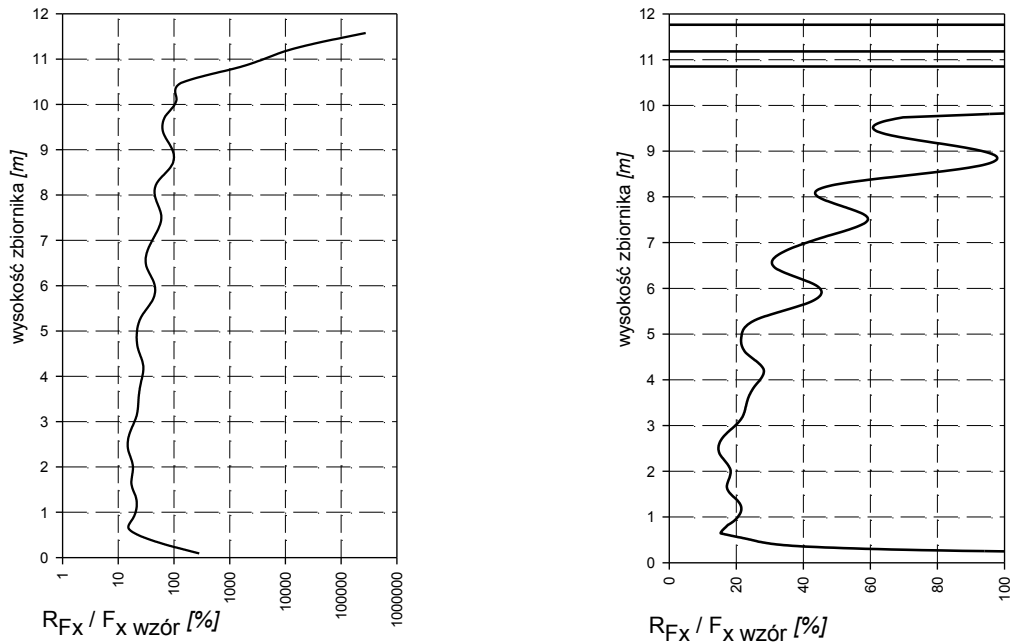
c) zmienność naprężeń zredukowanych dla konstrukcji idealnej

d) obwodnie zmienność naprężeń zredukowanych dla konstrukcji z imperfekcjami kształtu

Rys. 9.29. Porównanie zmienności naprężeń z uwzględnieniem nadatku korozyjnego

9.3.1. Zbiornik będący przedmiotem badań tensometrycznych

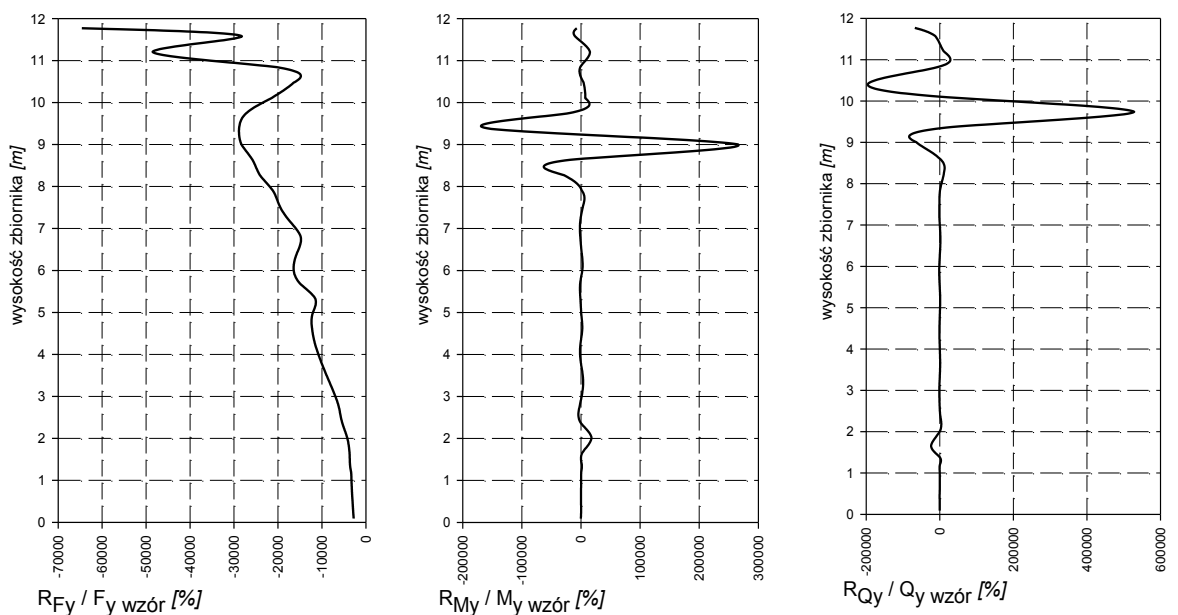
Dla zbiornika poddanego badaniu tensometrycznemu wykonano, podobnie jak dla poprzednich zbiorników, analizy zmienności sił wewnętrznych oraz naprężeń. Szczegółowe mapy rozkładów oraz obwiednie zostały przedstawione w załączniku 5. Poniżej zaprezentowano procentowe zakresy zmienności analizowanych wielkości statycznych, opracowane wg tej samej formuły jak podano wcześniej.



a) w skali logarytmicznej

b) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.30. Zakres zmienności siły obwodowej

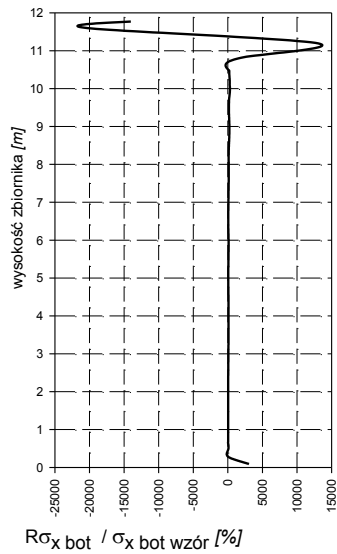


a) siły pionowej

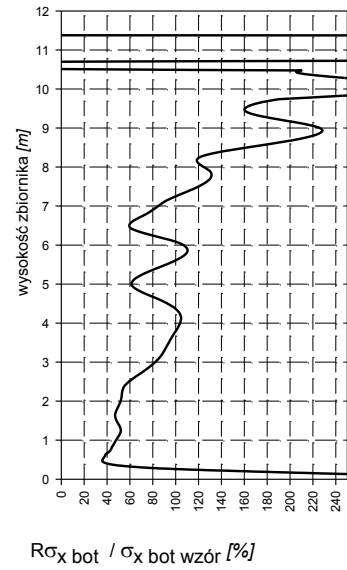
b) momentu

c) siły tnącej

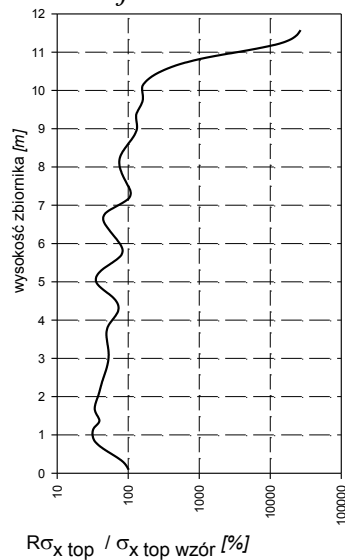
Rys. 9.31. Zakres zmienności



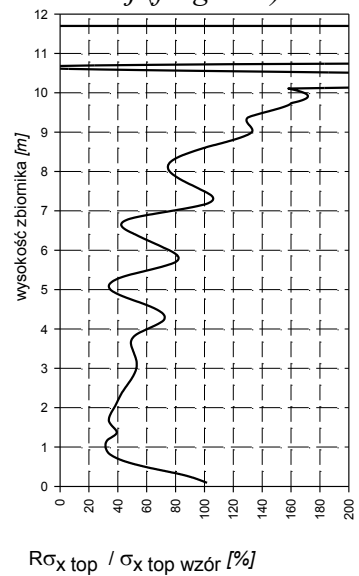
a) w skali liniowej



b) w skali liniowej (fragment)

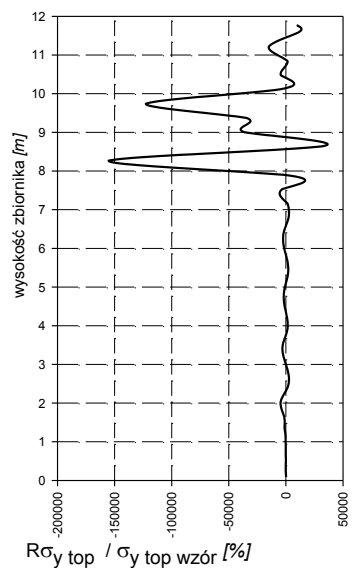
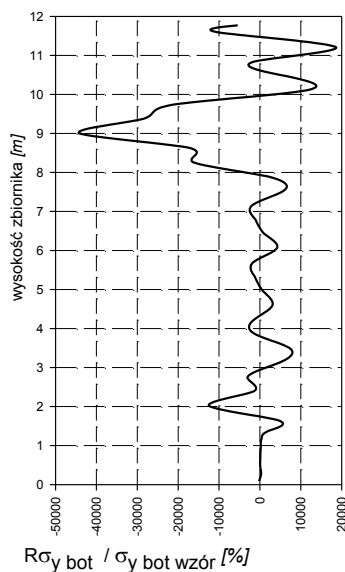


c) w skali logarytmicznej



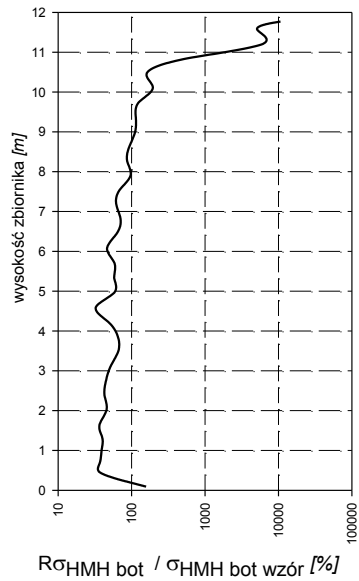
d) w skali liniowej (fragment)

Rys. 9.32. Zakres zmienności naprężeń obwodowych

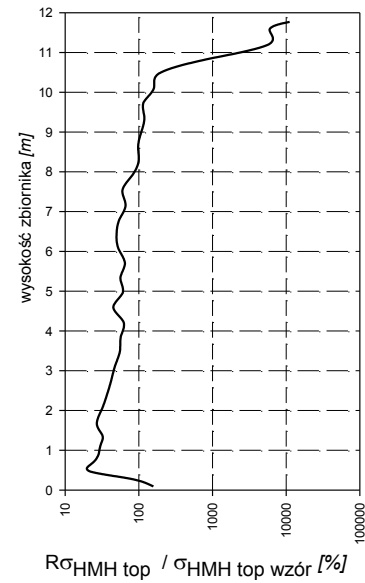


Rys. 9.33. Zakres zmienności naprężeń pionowych

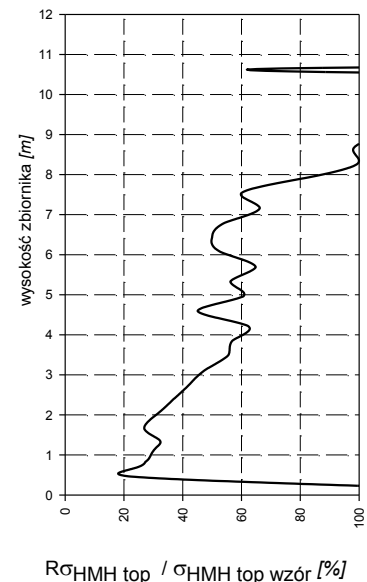
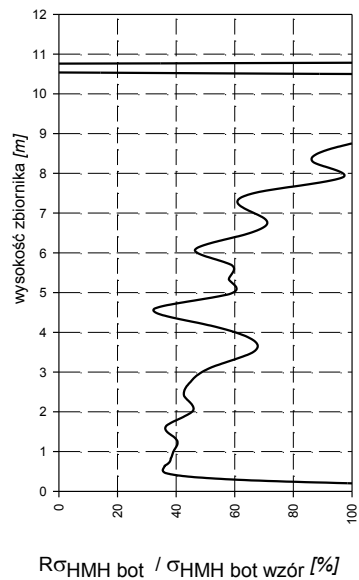
na powierzchni zewnętrznej



na powierzchni wewnętrznej



a) w skali logarytmicznej



b) w skali liniowej (fragment)

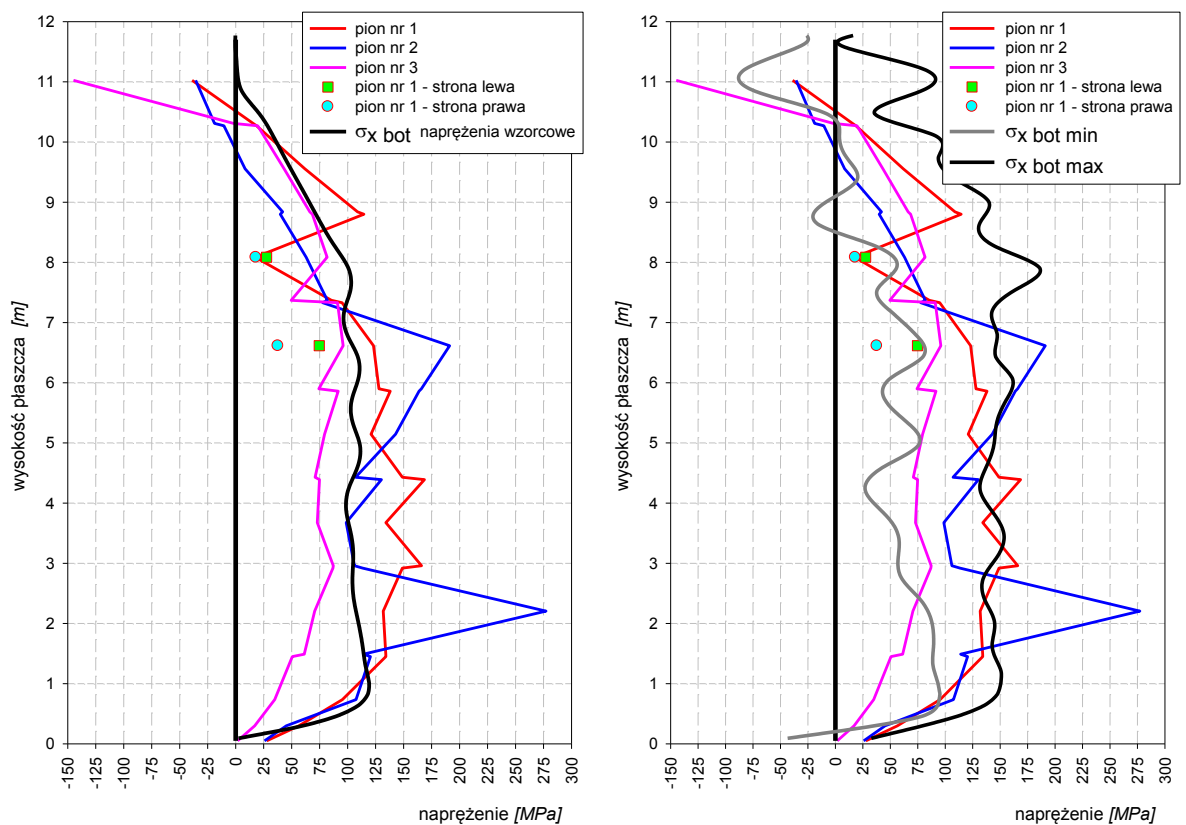
Rys. 9.34. Obwiednia zakres zmienności naprężeń zredukowanych wg teorii Hubera-Misesa

Prezentowane zakresy zmienności wartości sił wewnętrznych oraz naprężeń dla badanego zbiornika o mniejszych wymiarach geometrycznych są znacznie większe niż dla poprzedniej grupy zbiorników o pojemności 50 000 m³. Zaistniała sytuacja obliczeniowa potwierdza jedynie wnioski jakie zostały podane w poprzednim rozdziale (9.2), dotyczącym powłok testowych.

W obu przypadkach, zarówno dla powłok testowych o promieniu $R=10$ m oraz zbiornika poddanego badaniom tensometrycznym, występuje większe zróżnicowanie sił

oraz naprężeń. Na tej podstawie można stwierdzić, iż imperfekcje są bardziej niekorzystne w zbiornikach o mniejszych średnicach.

Na kolejnych wykresach zaprezentowano porównanie wartości uzyskanych w tensometrycznym teście badawczym z wartościami obliczonymi na drodze analiz numerycznych. Jako pierwszy zaprezentowano wykres (rys. 9.35a), w którym zestawiono wartość naprężeń na zewnętrznej stronie powłoki dla konstrukcji zbiornika bez imperfekcji z wartościami maksymalnymi uzyskanymi w trakcie pomiarów. Jak można prześledzić na wykresie wartość wzorcowa wpisuje się wewnątrz zakresu naprężeń pomierzonych, przy czym na pewnych fragmentach wysokości zbiornika obie analizowane wielkości pokrywają się.



a) z wartością wzorcową naprężeń dla płaszczu zbiornika o idealnym kształcie

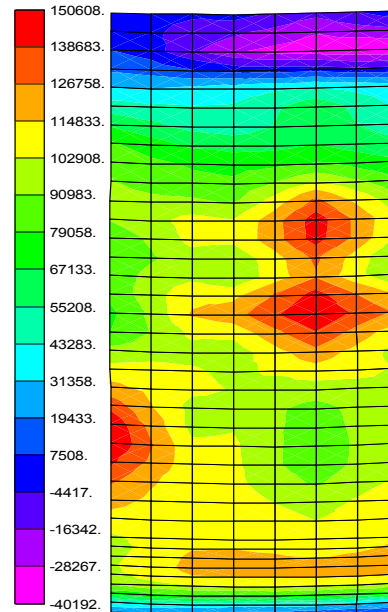
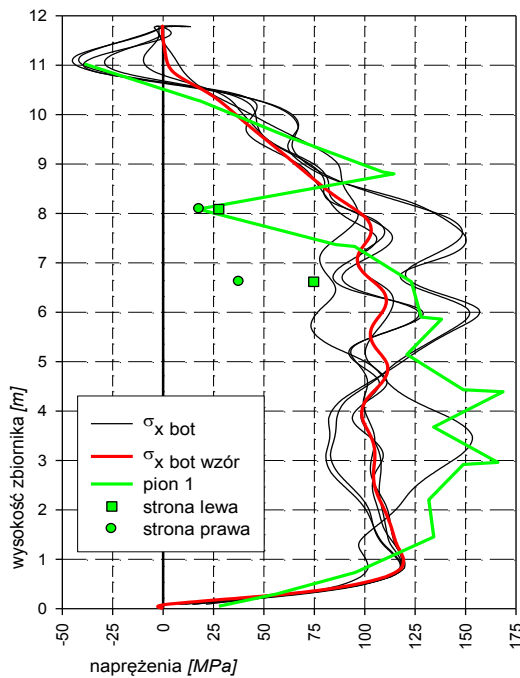
b) z obwiednią naprężeń dla płaszczu zbiornika z rzeczywistymi imperfekcjami geometrycznymi

Rys. 9.35. Zestawienie wartości naprężeń zmierzony w teście z obliczonymi numerycznie

Wykres prezentowany na rysunku 9.35b, a przedstawiający zestawienie wartości pomierzonych z wartościami obwiedni naprężeń uzyskanymi na drodze analizy numerycznej powłoki zbiornika z imperfekcjami kształtu pozwala stwierdzić, iż wartości testowe mieszczą się w przeważającej części w obszarze zmienności uzyskanym na drodze analiz numerycznych. Występujące tu niektóre odchylenia związane są z zakresem

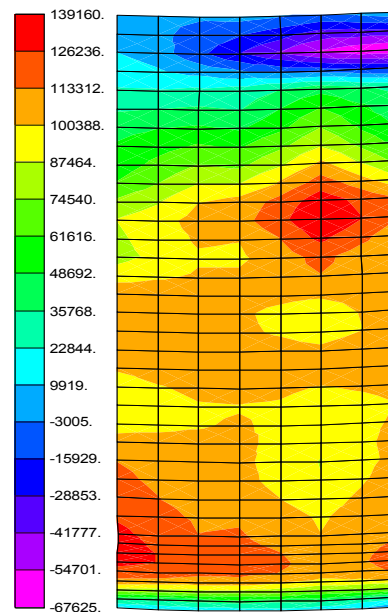
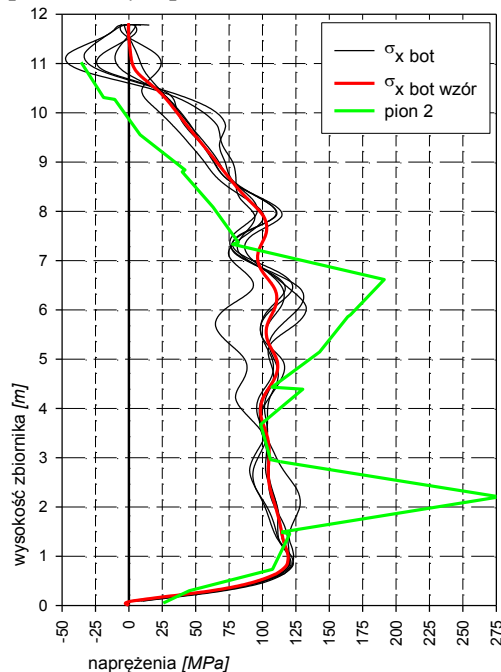
dokładności obu porównywanych metod badawczych jak i ewentualnym zjawiskiem dyslokacji imperfekcji w czasie napełniania zbiornika.

Kolejne prezentowane wykresy oraz wybrane fragmenty mapy naprężeń obwodowych pozwalają na porównanie obu zastosowanych metod badawczych. Wykresy oraz mapy rozkładów odpowiadają konkretnym miejscom prowadzenia badań pomiarowych na płaszczu zbiornika.



a) naprężenia obwodowe w obszarze pomiarowym pionu nr 1

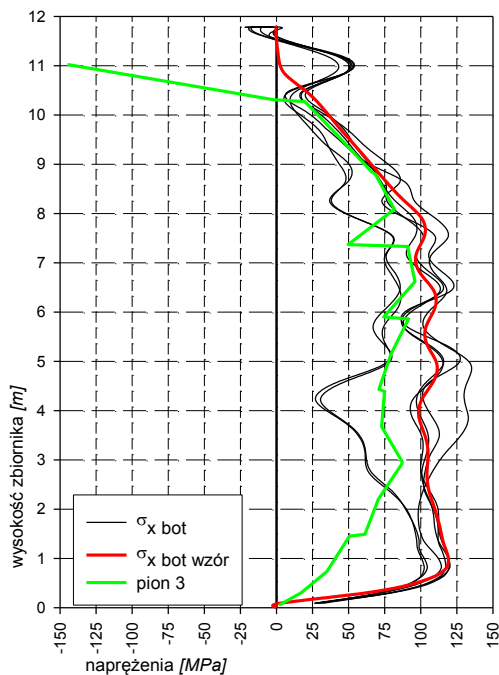
b) mapa rozkładu naprężeń [kPa] w rejonie pionu pomiarowego nr 1



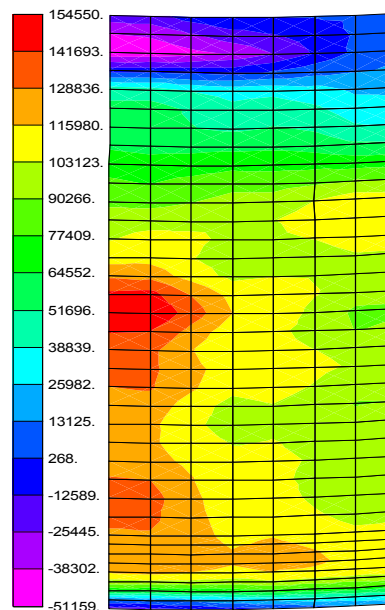
c) naprężenia obwodowe w obszarze pomiarowym pionu nr 2

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

Rys. 9.36. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami badania tensometrycznego



e) naprężenia obwodowe w obszarze pomiarowym pionu nr 3



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

Rys. 9.36.(cd) Porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami badania tensometrycznego

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 122
--	--	-----------------------------

10. Wnioski

Analizy przeprowadzone w niniejszej pracy pozwalają na następujące wnioski:

a) Imperfekcje geometryczne powłok walcowych zmieniają w sposób istotny rozkłady wszystkich sił wewnętrznych oraz naprężeń. Wpływ imperfekcji na wartości zmian jest odwrotnie proporcjonalny do promienia zakrzywienia powłoki płaszcza zbiornika, tzn. dla konstrukcji o mniejszych wymiarach wpływy zmian są dużo większe niż dla konstrukcji o większych wymiarach - pokazano to na przykładzie powłok testowych oraz na analizowanych rzeczywistych konstrukcjach zbiornikowych.

b) Podział analizowanych zbiorników o pojemności 50 000 m³ na dwie grupy, przyjęty w niniejszej pracy (grupy oznaczone numerami „1-6” i „7-13”), określony nie tylko na podstawie pewnych różnic w budowie, ale szczególnie na podstawie analiz statystycznych rzeczywistych wartości imperfekcji geometrycznych był słuszny i został potwierdzony w dalszej części pracy.

Wykonane analizy numeryczne potwierdziły, że wzrost wartości imperfekcji geometrycznej powłoki oraz ich wzajemne zróżnicowanie w obrębie konstrukcji powoduje wzrost ilościowy i jakościowy rozrzut wartości wielkości statycznych oraz naprężeniowych.

c) Obwiednie wartości naprężeń obwodowych jak i zredukowanych dla przeanalizowanych zbiorników o pojemności 50 000 m³ pozwalają stwierdzić, iż nie występują przypadki przekroczenia stanu naprężeń dopuszczalnych – obliczeniowych, dla odpowiednich gatunków stali.

Bezpieczeństwo eksploatacji obiektów pod działaniem obciążenia o wartości charakterystycznej jest zachowane. Analizy przeprowadzone dla medium wypełniającego zbiorniki w postaci wody, wraz z uwzględnieniem naddatków korozyjnych, pokazują 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.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 123
--	--	-----------------------------

W przypadku magazynowania ropy naftowej iloczyn wartości 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 polskich przepisach normowych [10-1] 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 [10-1], [10-2], [10-3], [10-5] są określone prawidłowo. Należy jednak wspomnieć, iż projekt nowej normy z serii Eurokod [10-4], dotyczącej powłok stalowych podaje w formie bardzo uproszczonej sposób określenia jakości wykonania powłoki pod względem prawidłowości kształtu. 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 „wspaniałe”.
- f) Analiza wytrzymałościowa konstrukcji zbiornikowych z imperfekcjami kształtu powinna uwzględniać ewentualne niskocyklowe zmęczenie materiału oraz wady materiałowe jak i wykonania spoin (przyjęta wartości współczynnika wytrzymałości spoin w analizowanych obiektach wynosi jeden), mające wpływ na lokalne zmiany stanu naprężeń i bezpieczeństwa konstrukcji.
- g) Analiza wybranych typów imperfekcji geometrycznych powłok walcowych wykonanych w niniejszej dysertacji pozwala na postawienie wniosku, w odniesieniu do norm przedmiotowych, by wprowadzić ograniczenie dotyczące

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 124
--	--	-----------------------------

falistości obwodu płaszcza zbiornika określanych w pracy jako imperfekcje obwodowe, szczególnie w części przydennej. Związane jest to z wykazanym obliczeniowo znacznym wzrostem naprężeń osiągającym granicę plastyczności. Wspomniany wniosek dotyczy szczególnie zbiorników o promieniu $R=10$ m, które zostały przeanalizowane w ramach niniejszej pracy. Dla innych promieni zakrzywienia powłoki należy wykonać dodatkowe przeliczenia sprawdzające.

10.1. Działania badawcze do dalszej realizacji

Przy dalszych ewentualnych pracach związanych z analizą wpływu imperfekcji na konstrukcje powłokowe należy wziąć pod uwagę następujące spostrzeżenia wynikające z niniejszej dysertacji:

- a) powtórzyć test badawczy na innej rzeczywistej konstrukcji zbiornikowej z imperfekcjami geometrycznymi. Przy tym badaniu zastosować opomiarowanie na obu powierzchniach powłoki w celu wychwycenia różnic spowodowanych efektem zgięciowym. Badanie przeprowadzić z uwzględnieniem pomiaru zmiany naprężeń w kierunku pionowym, oraz przy szczegółowym zinventaryzowaniu powierzchni powłoki w rejonie badań, szczególnie uwzględniając załamania kątowe oraz ich zasięg. Przeprowadzone badanie powinno usunąć wszystkie ograniczenia występujące w teście przeprowadzonym w ramach niniejszej pracy.
- b) skoncentrować się na w dalszych analizach na opracowaniu katalogu możliwych lokalnych odchyłek geometrii płaszcza w celu określenia ich wpływu na stan naprężeń, szczególne w rejonie połączeń spawanych płaszcza,
- c) przeprowadzić analizy numeryczne konstrukcji zbiorników, które pozwolą na uwzględnienie nie tylko efektów imperfekcji geometrycznych powłoki płaszcza, ale również nierównomierności osiadania zbiornika na obwodzie.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 125
--	--	-----------------------------

11. Bibliografia

11.1. Bibliografia do rozdziału 1

- [1-1] Biuro Projektów CPN „Naftoprojekt”: Dokumentacje projektowe typowych zbiorników z dachami stałymi i pływającymi. Wg Ziółko J. poz.[4-3]
- [1-2] *McGrath R.V.*: New concepts for storage tank design. Hydrocarbon Processing, 5-1976r.
- [1-3] Ziółko J.: Zabezpieczenia środowiska naturalnego przed skażeniem wywołanym eksploatacją zbiorników i rurociągów naftowych. Konstrukcje stalowe nr 3-4/2002r, Warszawa,
- [1-4] *Ziółko J.*: Zbiorniki metalowe na ciecze i gazy. Arkady, Warszawa 1986r.,

11.2. Bibliografia do rozdziału 4

- [4-1] *Chróścielewski J., Wizmur M.*: Modyfikacja zagadnienia zaburzeń brzegowych w zbiornikach cylindrycznych posadowionych na sprężystym podłożu. XXV Jubileuszowa Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław-Krynica 1979r.,
- [4-2] *Ziółko J., Orlik G.*: Montaż konstrukcji stalowych. Arkady, Warszawa 1980r.,
- [4-3] *Ziółko J.*: Zbiorniki metalowe na ciecze i gazy. Arkady, Warszawa 1986r.,

11.3. Bibliografia do rozdziału 5

- [5-1] *Baranchuk D.*: Analiza stanu naprężeń w połączeniu rurociągu produktowego z płaszczem pionowego stalowego zbiornika walcowego. Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. J. Ziółko, Wydział Inżynierii Lądowej Politechnika Gdańska, Gdańsk 2002r.,
- [5-2] *Jewstafiew Wł.*: Wpływ nierównomiernego osiadania fundamentu na stan naprężeń i deformacje poboczniczy cylindrycznego zbiornika stalowego z dachem pływającym. Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. J. Ziółko, Wydział Budownictwa Lądowego, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1980r.,

11.4. Bibliografia do rozdziału 6

- [6-1] *Abramek W., Centkowski J., i inni* : Analiza bezpieczeństwa żelbetowych chłodni kominowych z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych. Inżynieria i Budownictwo, 6/1993r., Warszawa,
- [6-2] *Andermann F., Kempny S.*: Zagadnienia brzegowe zbiornika walcowego spoczywającego na półprzestrzeni sprężysto – plastycznej. Konferencja naukowa Wybrane problemy naukowo - - badawcze mostownictwa i budownictwa, KILiW, KN PZITB, Gliwice, 17-06-1997r.,
- [6-3] API Standard 650 – Welded Steel Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute
- [6-4] *Baczyński Z., Janas M.*: Zagadnienia stateczności zbiorników stalowych na ciecze. Prace IPPT PAN, Warszawa, nr 26/1969
- [6-5] *Berry P.A., Bridge R.Q., Rotter J.M.*: Experiments on the buckling of axially compressed fabricated steel cylinders with axisymmetric imperfections. International Conference on Carrying Capacity of Steel Shell Structures, 1-3.10.1997r. Brno,
- [6-6] *Biegus A., Hotała E.*: Nośność graniczna uszkodzonych korozyjnie zbiorników stalowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 11/1999, Warszawa
- [6-7] *Bileckij S.M., Barwinko J.P., Golińko W.M.*: Ocena niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej cylindrycznych zbiorników stalowych z deformacjami płaszczu. Inżynieria i Budownictwo, 12/1991r., Warszawa,
- [6-8] *Błaszczak G.*: Wybrane zagadnienia wykonawstwa konstrukcji zbiorników. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [6-9] BS 2654 :1984 – British Standard Specification for Manufacture of vertical steel welded storage tank with butt welded shells for the petroleum industry (nowelizacja 1989r.)

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 126
--	--	-----------------------------

- [6-10] *Chróścielewski J., Wizmur M.*: Modyfikacja zagadnienia zaburzeń brzegowych w zbiornikach cylindrycznych posadowionych na sprężystym podłożu. XXV Jubileuszowa Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław-Krynica 1979r.,
- [6-11] DIN 18800 Teil IV – Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Schaleulen,
- [6-12] DIN 4119 Teil 1 Jun 1979 – Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen, Grundlagen, Ausführung, Prüfungen,
- [6-13] DIN 4119 Teil 2 Feb 1980 – Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen, Berechnung,
- [6-14] *ECCS, European recommendations for steel construction. Buckling of shells, Publication No 56, 1988.*
- [6-15] *Filipow E., Wekezer J., Wilde P.*: Stochastyczny model odchyłek powierzchni zbiorników cylindrycznych. Zeszyt PTMTS – Gliwice i Politechniki Śląskiej nr 7, 1973r.,
- [6-16] *Filipow E.*: Analiza numeryczna płaskich zagadnień teorii sprężystości z uwzględnieniem losowych pól odchyłek. Praca doktorska Instytut Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej,
- [6-17] *Filipow E.*: Generowanie losowych odchyłek początkowych powłok zbiorników walcowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 204, Budownictwo Lądowe XXV, Wydawnictwo Uczelniane PG, Gdańsk 1973r.,
- [6-18] *Flügge W.*: Powłoki - obliczenia statyczne. Arkady, Warszawa 1972r.,
- [6-19] *Girkmann K.*: Dźwigary powierzchniowe, wstęp do elastoplastyki tarcz, płyt, powłok i tarczownic. Arkady Warszawa, 1957r.,
- [6-20] *Golaś J., Kasperski Z.*: Numeryczna analiza statyczna powłok obrotowych metodą elementów skończonych. Archiwum Inżynierii Lądowej 1973r.,
- [6-21] *Golaś J., Kasperski Z.*: Obliczenia numeryczne powłok obrotowych metodą elementów skończonych. PWN, Warszawa-Wrocław 1978r.,
- [6-22] *Golaś J.*: Rozwiązania zagadnień statycznych powłok obrotowych przy zastosowaniu metod elementów skończonych. Rozprawy Inżynierskie 25, PAN, IPPT, Warszawa 1977r.,
- [6-23] *Golaś J.*: Pewne rozwiązania statyczne i dynamiczne powłok obrotowych z uwzględnieniem ich osiowo-symetrycznych odchyłek wykonawczych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe XXXI, nr 272, Gdańsk 1977r.,
- [6-24] *Golaś J.*: Uwzględnienie odchyłek geometrycznych w analizie statecznej powłok obrotowych. XXV Jubileuszowa Konferencja Naukowa KILiW i KN PZITB, Wrocław-Krynica, 1979r.,
- [6-25] *Górski J., Jasina M.*: Identyfikacja i symulacja imperfekcji geometrycznych płyt. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 585, Budownictwo Lądowe LVI, Gdańsk 2001r.,
- [6-26] *Górski J.*: Simulation-based nonlinear analysis of imperfect structures. Archiwum Inżynierii Lądowej, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001r.,
- [6-27] *Grzebalski J.*: Wyniki badań zbiorników cylindrycznych po 30-letniej eksploatacji. Materiały, seminarium, „Jakość naziemnych zbiorników w eksploatacji”, Zakopane 1995r.,
- [6-28] *Gwizdała S.*: Zagadnienia dotyczące posadowienia zbiorników na paliwa płynne. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [6-29] *Hailan K.*: Wpływ posadowienia stalowego zbiornika cylindrycznego na stan naprężeń w jego płaszczu i dnie. Praca doktorska na Wydziale Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. J. Ziółko, Gdańsk 1995r.,
- [6-30] *Holst J. M., Rotter J. M.*: Nonlinear response and buckling of cylindrical tanks due to foundation settlement. International Conference on Design, Inspection, Maintenance and Operation of cylindrical steel tanks and Pipelines, Prague, 8-10.10.2003r.,
- [6-31] *Hornung U., Saal H.*: Stresses in unanchored tank shells due to settlement of the tank foundation. International Conference on Carrying Capacity of Steel Shell Structures, 1-3.10.1997r. Brno,
- [6-32] *Hubner A., Teng J.G., Saal H.*: Buckling behavior of extensively welded steel cylinders, International Conference on Design, Inspection, Maintenance and Operation of Cylindrical Steel Tanks and Pipelines, Prague 2003r.,
- [6-33] *Jewstafiew Wl.*: Stan naprężeń i deformacje poboczniczy zbiornika pod wpływem nierównomiernego osiadania. Sesja naukowa PG, 35 lat WBL, Gdańsk, VI 1980r.,

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 127
--	--	-----------------------------

- [6-34] *Jewstafiew Wł.*: Deformacje i stan naprężeń w poboczniczy zbiornika wywołane lokalnym brakiem podparcia obwodu dna. XXVII Konferencja naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Warszawa-Krynica 1981r.,
- [6-35] *Jewstafiew Wł.*: Wpływ nierównomiernego osiadania fundamentu na stan naprężeń i deformacje poboczniczy cylindrycznego zbiornika stalowego z dachem pływającym. Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. J. Ziółko, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1980r.,
- [6-36] *Jonaidi M., Ansourian P.*: Non-Linear behavior of storage tan shells under harmonic edge settlement. International Conference on Carrying Capacity of Steel Shell Structures, 1-3.10.1997r. Brno
- [6-37] *Kalisz H.*: Rozkład sił wewnętrznych w zbiornikach cylindrycznych z uwzględnieniem sprężystego oddziaływania gruntu. XXVII Konferencja Naukowa KILiW i Komitetu Nauki PZITB, Warszawa-Krynica 1981r.,
- [6-38] *Katanow A. A., Popowski B. W.*: Techniczne rozwiązanie zbiorników i komputerowe modelowanie naprężeniowo - odkształceniowe rzeczywistych defektów konstrukcji. Montażnyje i Spicialnyje Raboty w Stroitelstwie, 7-8/1998r.
- [6-39] *Kielawa J.*: Niektóre problemy projektowania spawanych zbiorników niskociśnieniowych dużych pojemności. Przegląd Spawalnictwa XXVIII, 4/1976r., Warszawa,
- [6-40] *Konderla P.*: Nieliniowe rozwiązanie powłoki o kształcie hiperboloidy jednopowłokowej. część. I., Obciążenie osiowo-symetryczne, Archiwum Inżynierii Lądowej, 1973r.,
- [6-41] *Konderla P.*: Nieliniowe rozwiązanie powłoki o kształcie hiperboloidy jednopowłokowej. część. II., Obciążenie niesymetryczne, Archiwum Inżynierii Lądowej, 1974r.,
- [6-42] *Konderla P.*: Rozwiązanie powłoki o kształcie hiperboloidy jednopowłokowej za pomocą metody elementów skończonych. Archiwum Inżynierii Lądowej, 1973r.,
- [6-43] *Kordecki Z., Pytel E.*: Wpływ niedokładności kształtu poboczniczy zbiornika walcowego na wartości sił wewnętrznych. Inżynieria i Budownictwo, nr 4/1979, Warszawa,
- [6-44] *Kowalski D.*: Naprężenia w płaszczu zbiornika stalowego z lokalnymi deformacjami. Inżynieria i Budownictwo, 6/2001r., Warszawa,
- [6-45] *Kowalski D.*: Ocena kosztów wykonania cylindrycznego zbiornika na paliwa w zależności od gatunków stali i wymiarów blach. Inżynieria i Budownictwo, 7/1997r., Warszawa,
- [6-46] *Kowalski W.*: Analiza wpływu wad wykonania i przyspoinowych ubytków korozyjnych na wytrzymałość stalowych zbiorników walcowych. Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. J. Ziółko, Wydział Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1990r.,
- [6-47] *Křupka V.*: Shell-to-base joint study of vertical cylindrical tanks. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 585, Budownictwo Lądowe LVI, Gdańsk 2001r.,
- [6-48] *Lessig E., Liliejew A., Sokolow A.*: Listowye metaliczeskije konstrukcji. Izdatelstwo Literatury po Stritelstwie, Moskwa 1970r.,
- [6-49] *Lundgren H.*: Powłoki walcowe. Arkady, Warszawa 1963r.,
- [6-50] *Łapko A.*: Nomogramy do obliczania sił wewnętrznych w walcowych zbiornikach obciążonych symetrycznie. Inżynieria i Budownictwo 12/1990r., Warszawa,
- [6-51] *Mazurkiewicz Z., Pieńczykowski L.*: Obrotowo symetryczne zginanie powłoki cylindrycznej o zmiennej sztywności. Archiwum Inżynierii Lądowej, Warszawa 1973r.,
- [6-52] *Mazurkiewicz Z.E., Nagórski R.*: Powłoki obrotowe sprężyste. PWN, Warszawa 1987r.,
- [6-53] *Mendera Z.*: Interakcja niestateczności sprężystej i plastycznej w powłokach walcowych z imperfekcjami. Archiwum Inżynierii Lądowej, PWN, Warszawa, 1987r.,
- [6-54] *Mendera Z.*: Normalizacja warunku stateczności powłok walcowych i kulistych. Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna Konstrukcje Metalowe, Gdańsk 1984r.
- [6-55] *Mendera Z.*: Projektowanie stalowych zbiorników na paliwa płynne metoda stanów granicznych. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [6-56] *Mendera Z.*: Stateczność stalowych powłok walcowych ściskanych podłużnie. Inżynieria i Budownictwo, 4-5/2000, Warszawa,
- [6-57] *Mendera Z.*: W sprawie stateczności metalowych powłok walcowych ściskanych podłużnie. XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław-Krynica 1999r.

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 128
--	--	-----------------------------

- [6-58] *Menyhard I.*: Konstrukcje powłokowe – obliczenia statyczne i kształtowanie. Arkady, Warszawa 1971r.,
- [6-59] *Morawski T., Wichtowski B.*: Badania uszkodzeń korozyjnych stalowych zbiorników naziemnych wg przepisów API 653. Inżynieria i Budownictwo, 5/1997r., Warszawa,
- [6-60] *Morawski T.*: Badania i naprawy zbiorników naziemnych – wymagania normy API 653. Materiały, seminarium, „Jakość naziemnych zbiorników w eksploatacji”, Zakopane 1995r.,
- [6-61] *Morawski T.*: Stan techniczny eksploatowanych zbiorników naziemnych. materiały, seminarium, „Jakość naziemnych zbiorników w eksploatacji”, Zakopane 1995r.,
- [6-62] *Murzewski J.*: Niezawodność konstrukcji inżynierskich. Arkady, Warszawa 1989r.,
- [6-63] *Murzewski J.*: Bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych. Arkady, Warszawa 1970r.,
- [6-64] *Nowacki W.*: Dźwigary powierzchniowe. PWN, Warszawa 1979r.
- [6-65] *Orlik G.*: Deformacje kształtu stalowych zbiorników cylindrycznych, ich statyczne własności oraz symulacja numeryczna. Praca doktorska pod kierunkiem doc. dr hab. inż. J. Ziółko, Wydział Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1976r.,
- [6-66] *Orlik G.*: Statystyczne własności technologiczne nieprawidłowości kształtu stalowych zbiorników cylindrycznych. Archiwum Inżynierii Lądowej, zeszyt 2, Warszawa 1974r.,
- [6-67] *Persona M., Antoniak D.*: Wpływ imperfekcji na rozkład sił wewnętrznych w powłoce chłodni kominowej. XL Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Rzeszów-Warszawa - Krynica 1994r.,
- [6-68] *Pieśła W.*: Tabelaryczne wyznaczanie sił w połączeniu poboczniczy z dnem zbiorników na produkty naftowe. Zeszytu Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe XXVI, nr 223, Gdańsk 1974r.,
- [6-69] PN-81/B-03210 - Konstrukcje stalowe. Zbiorniki walcowe pionowe na ciecze. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [6-70] PN-84/B-06210 – Konstrukcje stalowe – Zbiorniki walcowe pionowe na ciecze – Wymagania i badania.
- [6-71] PN-B-03210:1997 - Konstrukcje stalowe, Zbiorniki walcowe pionowe na ciecze, Projektowanie i wykonanie.
- [6-72] *Ponomariew K.*: Odchylenia geometrycznej formy pionowych zbiorników cylindrycznych. Azerbejdżańskie, Nieftianoje Chozjajstwo, nr 8/1956r.,
- [6-73] *Ponomariew K.*: Odształcenia miejscowe w powłokach stalowych zbiorników walcowych. Inżynieria i Budownictwo, 04/1959r., Warszawa,
- [6-74] *Radwańska M.*: Analiza stateczności i dużych przemieszczeń ustrojów powierzchniowych za pomocą MES. monografia 105, Politechnika Krakowska, Kraków 1990r.,
- [6-75] *Runge C.*: Über die Formänderung eines zylindrischen Wasserbehälters durch den Wasserdruck. Z. MATH. Phys. 1904r.,
- [6-76] *Rządkowski J.*: Badania imperfekcji geometrycznych i stateczności płaszczy zbiorników z dachami pływającymi. Konferencja naukowa „Badania nośności granicznej konstrukcji metalowych”, Wrocław-Szklarska Poręba, 23-24.10.1998r.,
- [6-77] *Schneider P.*: Zusätzliche Beanspruchungen vertikaler durch ungleichmäßige rotationsymmetrische Fundamentabsenkungen. Stahlbau 62/1993, heft 9, Berlin,
- [6-78] *Shimanovsky O.V., Gordeyev V.M., Yuras Z.A.*: Post-repair durability of cylindrical tanks – theory, analysis, and some practical engineering applications. International Conference on Design, Inspection, Maintenance and Operation of Cylindrical Steel Tanks and Pipelines, Prague 2003r.,
- [6-79] *Skowronek M.*: Wybrane zagadnienia teorii cienkich powłok z uwzględnienie losowego charakteru geometrii i obciążenia. Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe XXXVII nr 333 Gdańsk 1981r.,
- [6-80] *Smoleń T.*: Wpływ odchyłek wykonawczych na stan naprężenia w powłoce chłodni kominowej. XXV jubileuszowa Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław 1979 Krynica,
- [6-81] *Szechiński M., Siwiec P.*: Wpływ deformacji powłoki chłodni kominowej na obciążenie wiatrem. Inżynieria i Budownictwo, 3/1997, Warszawa
- [6-82] *TGL 13503/1* - Stahlbau, Stabilität von Stahlregwerken. Grundlagen, DDR, Standard, 1982r.,
- [6-83] *Timoshenko S.*: Teoria sprężystości. Arkady, Warszawa 1962r.,

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 129
--	--	-----------------------------

- [6-84] *Timoshenko S.P.; Gere J.M.*: Teoria stateczności sprężystej, Arkady, Warszawa 1963r.,
- [6-85] *Waszczyszyn Z., Bartczak M.*: Neuronowa predykcja obciążeń krytycznych ściskanych powłok cylindrycznych z imperfekcjami geometrycznymi. Konferencja Naukowa KILiW i Komitetu Nauki PZITB, Opole-Krynica 2001r.,
- [6-86] *Waszczyszyn Z., Cichoń C. Radwańska M.*: Metody elementów skończonych w stateczności konstrukcji. Arkady, Warszawa 1990r.,
- [6-87] *Waszczywszyn Z., Pabisek E.*: Nieliniowa analiza powłoki żelbetowej chłodni kominowej z imperfekcjami geometrycznymi i otworem technologicznym. XLIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Poznań-Krynica 1997r.,
- [6-88] *Wilde P., Orlik G.*: Symulacja ciągu losowego na EMC w zastosowaniu do analizy odchyłek pobocznicy zbiorników cylindrycznych. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [6-89] *Wilde P., Sawicki A., Matulewicz Z.*: Numeryczna analiza stateczności płaszczu zbiornika w ramach nieliniowej teorii powłok. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [6-90] *Wlasow W. Z.*: Obszczaia teoria obołoczek i ej przyłozenie w technike. Moskwa, 1949r.,
- [6-91] *Wojewódzki W.*: Nośność graniczna powłok. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002r.,
- [6-92] *Wojnowski W., Wirkowski Cz.*: Analiza zmęczenia niskocyklowego na przykładzie konstrukcji zbiornika wieżowego. Konstrukcje stalowe, 4(18), październik 1997r., Warszawa,
- [6-93] *Wojnowski W.*: Analiza metod określania wyężenia materiału w spoinie czołowej przy niskocyklowym obciążeniu. Inżynieria i Budownictwo, 2/2000, Warszawa
- [6-94] *Wolmir A.S.*: Ustojczivost deformirujemych sistem, Nauka, Moskwa 1967r.,
- [6-95] *Ziółko J., Jewstafiew Wł.*: Analiza stanu naprężeń w pobocznicy zbiornika przy nierównomiernym jego osiadaniu. Opracowanie naukowe, Instytut Konstrukcji Budowlanych WBL PG, Gdańsk 1979r.,
- [6-96] *Ziółko J., Kielawa J.*: Ocena konstrukcji prototypowego zbiornika z dachem pływającym po 22 latach eksploatacji. Inżynieria i Budownictwo, 10/1983r., Warszawa,
- [6-97] *Ziółko J., Kowalski W.*: Zagadnienia technologiczne przy korekcie kształtu płaszczu stalowych zbiorników cylindrycznych. Międzynarodowe Stowarzyszenie Konstrukcji Powłokowych i Przestrzennych, Materiały pokonferencyjne Kolokwium: Przeglądy techniczne i remonty zbiorników magazynowych, Grupa robocza nr 1 - Rurociągi i Zbiorniki, Gdańsk 1994r.,
- [6-98] *Ziółko J., Mikulski T.*: Analiza rozkładu sił wewnętrznych w połączeniu płaszczu z dnem w stalowym zbiorniku o zdeformowanym obwodzie dna. Zeszytu Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe L, nr 520, Gdańsk, 1995r.,
- [6-99] *Ziółko J., Mikulski T.*: Analiza połączeniu płaszczu z dnem w stalowym zbiorniku posadowionym na skokowo zmiennym podłożu. XLI Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Kraków krynica 1995r.,
- [6-100] *Ziółko J.*: Analiza korozyjnych uszkodzeń zbiorników stalowych na paliwa płynne. Inżynieria i Budownictwo, 11/1985, Warszawa,
- [6-101] *Ziółko J.*: Formkorrektur Mäntel zylindrischer Stahlbehälter. Stahlbau 62/1993, heft 5, Berlin,
- [6-102] *Ziółko J.*: Imperfekcje stalowych zbiorników walcowych – przyczyny ich powstawania, sposób ograniczania. Inżynieria i Budownictwo, nr 11/1999, Warszawa,
- [6-103] *Ziółko J.*: Instandsetzung am verformten Mantel eines zylindrischen Stahlbehälters. Stahlbau 62/1993, heft 6, Berlin,
- [6-104] *Ziółko J.*: Korekta kształtu płaszczu cylindrycznego zbiornika stalowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej Budownictwo Lądowe L1, nr 522, Gdańsk 1995r., (Inżynieria i Budownictwo 11/1992, Warszawa),
- [6-105] *Ziółko J.*: Kruche pęknięcia płaszczu zbiorników stalowych. Politechnika Gdańska, Gdańsk 1990r.,
- [6-106] *Ziółko J.*: Naprawa podziemnego zbiornika stalowego. Inżynieria i Budownictwo, 12/1991, Warszawa
- [6-107] *Ziółko J.*: Naprawa uszkodzonych stalowych zbiorników cylindrycznych. Przegląd Spawalnictwa XXVIII, 4/1976r., Warszawa,

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 130
--	--	-----------------------------

- [6-108] *Ziółko J.*: Naprawy dachów i płaszczy zbiorników stalowych zdeformowanych w wyniku działania podciśnienia.
- [6-109] *Ziółko J.*: Remonty i wzmocnienia zbiorników stalowych. XV Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 23-26.02.2000r.,
- [6-110] *Ziółko J.*: Reparatur von Dächern und Mänteln durch Unterdruck verformter Stahltanks. Stahlbau, 70/2001, heft 5, Berlin,
- [6-111] *Ziółko J.*: Reparatur von Schweißnähten während des Betriebs eines Tanks mit Schwimmdach. Stahlbau 59/1990, heft 6, Berlin
- [6-112] *Ziółko J.*: Wpływ grubości blach na zaburzenia brzegowe w połączeniu płaszcza z dnem w zbiornikach cylindrycznych. XXV Jubileuszowa konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 1989r.,
- [6-113] *Ziółko J.*: Wpływ podatności fundamentu na zaburzenia brzegowe w połączeniu płaskiego dna z cylindrycznym płaszczem zbiornika. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Konstrukcje Metalowe, tom 4, Gdańsk 1984r.,
- [6-114] *Ziółko J.*: Zbiorniki metalowe na cieczy i gazy. Arkady, Warszawa 1986r.,
- [6-115] *Ziółko J.*: Zbiorniki stalowe z pływającymi dachami. Inżynieria i Budownictwo, 12/1960r., Warszawa,
- [6-116] *Ziółko J.*: Uszkodzenia konstrukcji zbiorników w wyniku nieprawidłowej eksploatacji lub złej technologii robót remontowo – montażowych. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [6-117] EN 1993-1-6:2004 - Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.6: General Rules: Strength and Stability of Shell Structures.

11.5. Bibliografia do rozdziału 7

- [7-1] *Kowalski D.*: Badania tensometryczne stalowych płaszczy zbiorników z imperfekcjami kształtu. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Konstrukcje Metalowe – Gdańsk 2001r.” Gdańsk, 6-8.06.2001r.,
- [7-2] *Kowalski D.*: Badania tensometryczne płaszcza zbiornika z imperfekcjami kształtu. Badania materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich, Wrocław 17-18.06.2004r.,
- [7-3] *Kowalski D.*: Stresses in the tank shell with shape deformation. International Conference on Design, Inspection, Maintenance and Operation of cylindrical steel tanks and Pipelines, Prague, 8-10.10.2003r.
- [7-4] PN-B-03210:1997 - Konstrukcje stalowe, Zbiorniki walcowe pionowe na cieczy, Projektowanie i wykonanie.
- [7-5] *Roliński Z.*: tensometria oporowa. WNT, Warszawa 1981r.,
- [7-6] *Ziemmermann R.*: Pomiar naprężeń i drgań metodami elektrycznymi. PWT, Warszawa 1959r.,

11.6. Bibliografia do rozdziału 8

- [8-1] *Brandt S.*: Analiza danych. WN PWN, Warszawa 1998,
- [8-2] *Klonecki W.*: Statystyka dla inżynierów. WN PWN, Warszawa 1999,
- [8-3] *Kowalski D.*: Correctness of work execution in tank construction in statistics. 19th Czech and Slovak International Conference Steel Structures and Bridges 2000, Strbske Pleso, 27-30.09.2000r.,
- [8-4] *Kowalski D.*: Dokładność wykonawstwa konstrukcji zbiornikowych w ujęciu statystycznym i wytrzymałościowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 585/2001r.
- [8-5] *Kowalski D.*: Jakościowa i ilościowa ocena odchyłek wykonania płaszczy zbiorników stalowych. Problemy eksploatacyjne baz magazynowych produktów naftowych, Poznań 11-12.05.1999r.,
- [8-6] *Kubik L. T.*: Zastosowanie elementarnego rachunku prawdopodobieństwa do wnioskowania statystycznego. WN PWN, Warszawa 1998,
- [8-7] *Sobczyk M.*: Statystyka. WN PWN, Warszawa 1998,

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 131
--	--	-----------------------------

11.7. Bibliografia do rozdziału 9

- [9-1] Biuro Projektów CPN „Naftoprojekt”: Dokumentacje projektowe zbiorników z dachami pływającymi o pojemności $V=50.000\text{ m}^3$ – Warszawa,
- [9-2] MacNeal R.H.: Perspective on finite elements for shell analysis. Elsevier, Finite Elements in Analysis and Design nr 30, 1998r .
- [9-3] *MacNeal R. H., Wilson Ch.T.*: The treatment of shell normals in finite element analysis. Elsevier, Finite Elements in Analysis and Design nr 30, 1998r .
- [9-4] MSC/Nastran for Windows 2001 - program obliczeniowy z instrukcjami obsługi i podręcznikami użytkownika: User’s Guide, 1999r. USA,
- [9-5] PN-81/B-03210 - Konstrukcje stalowe. Zbiorniki walcowe pionowe na cieczy. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [9-6] PN-B-03210:1997 - Konstrukcje stalowe, Zbiorniki walcowe pionowe na cieczy, Projektowanie i wykonanie.
- [9-7] PN-B-03264:2002 – Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie,
- [9-8] Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa 1987r.,

11.8. Bibliografia do rozdziału 10

- [10-1] API Standard 650 – Welded Steel Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute
- [10-2] BS 2654 :1984 – British Standard Specification for Manufacture of vertical steel welded storage tank with butt welded shells for the petroleum industry.,
- [10-3] DIN 4119, Teil 1 Jun 1979 – Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen, Grundlagen, Ausführung, Prüfungen, Teil 2 Feb 1980 – Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen, Berechnung.,
- [10-4] EN 1993-1-6:2004 - Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.6: General Rules: Strength and Stability of Shell Structures.,
- [10-5] PN-B-03210:1997 - Konstrukcje stalowe, Zbiorniki walcowe pionowe na cieczy, Projektowanie i wykonanie.,

11.9. Literatura uzupełniająca

- [U-1] Bielak S.: Teoria powłok cz. II. Politechnika Śląska, Gliwice 1993r.
- [U-2] Jong J.: An introduction to the EENUA publication No. 159: User’s Guide to the inspection, maintenance and repair of above-ground vertical cylindrical steel storage shell. International Conference on Design, Inspection, Maintenance and Operation of Cylindrical Steel Tanks and Pipelines, Prague 2003r.,
- [U-3] *Kutyłowski R., Myśliński K.*: Zakrzywiony izoparametryczny czworokątny element skończony w analizie powłok obrotowych. Komitet Inżynierii Lądowej i wodnej PAN i Komitet nauki PZITB, 1981 Krynica,
- [U-4] Magnucki K.: Wytrzymałość i optymalizacja zbiorników cienkościennych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Poznań 1998r.,
- [U-5] Namysł R.: Analiza numeryczna stycznej pracy zbiorników walcowych pod wpływem obciążenia wiatrem o charakterze losowym. Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe XXIX, Gdańsk 1976r., (Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,)
- [U-6] Popowski B.: Decisions on one special technical problem in the constructions of tanks. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 585, Budownictwo Lądowe LVI, Gdańsk 2001r.,
- [U-7] Radkowski G.: Metoda elementów skończonych – wybrane problemy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996r.,

Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej Katedra Konstrukcji Metalowych	<i>Praca doktorska</i> Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej	<i>Strona</i> 132
--	--	-----------------------------

- [U-8] Rakowski G., Kacprzyk Z.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993r.,
- [U-9] Rosłaniec S. Wybrane metody numeryczne z przykładami zastosowań w zadaniach inżynierskich. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002r.,
- [U-10] Zienkiewicz O.C. Metoda elementów skończonych. Arkady, Warszawa 1972r.,
- [U-11] Borkowski A., Cichoń C. i inni: Mechanika budowli. Ujęcie komputerowe. Tom 3, Arkady, Warszawa 1995r.,
-