

This is a post-print of: PhD Thesis, Politechnika Gdańska, 2004.

Kowalski D. „Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej”, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.

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

Dariusz Kowalski
Politechnika Gdańska, Gdańsk, Polska

Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.

Kowalski D. „Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej”, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.



Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
Katedra Konstrukcji Metalowych



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. Imperfekcji 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

This is a post-print of: PhD Thesis, Politechnika Gdańska, 2004.

Kowalski D. „Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej”, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.

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.	Literatura	125
11.1.	Literatura do rozdziału 1	125
11.2.	Literatura do rozdziału 4	125
11.3.	Literatura do rozdziału 5	125
11.4.	Literatura do rozdziału 6	125
11.5.	Literatura do rozdziału 7	130
11.6.	Literatura do rozdziału 8	130
11.7.	Literatura do rozdziału 9	131
11.8.	Literatura do rozdziału 10	131
11.9.	Literatura uzupełniająca	131
12.	Literatura	136

TOM 2

Załączniki

1. Badania tensometryczne walcowej powłoki płaszczu zbiornika
2. Pomiar geometryczny płaszczy 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

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.

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.

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.

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:

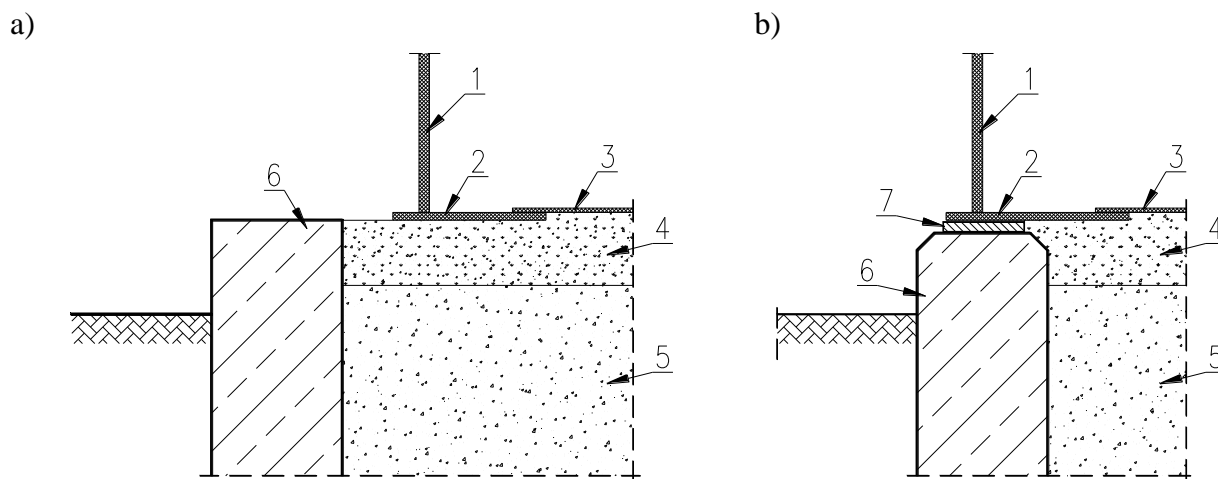
- średnica wewnętrzna płaszczu - 64,80 m,
- wysokość całkowita płaszczu - 18,10 m,

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

$I_D=0,97\div 1,0$. 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:

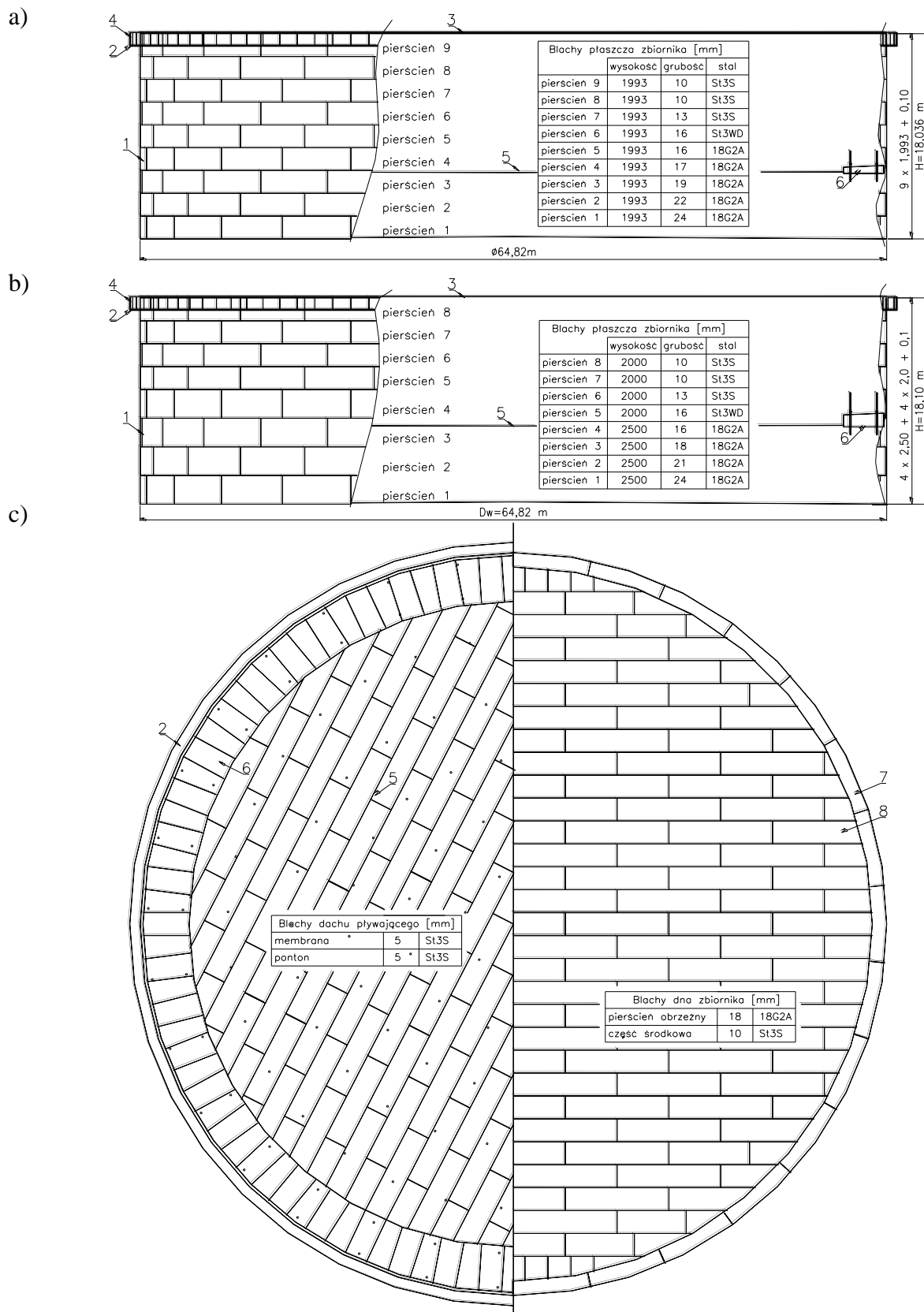
- 50 kN/m³ dla fundamentu piaskowego,
- 600 000 kN/m³ dla fundamentu żelbetowego.

Zjawisko to, podobnie jak już opisane wyżej, jest przyczyną zmiany stanu wyężenia w węźle połączenia blach płaszczu 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 $V=50\ 000\ m^3$

- 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

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 płaszczu
- niestopowej stali o znaku St3S – kategoria wytrzymałościowa E235 – wyższe pierścienie płaszczu.

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 płaszczu zbiornika w odległości 1100 mm od górnej krawędzi płaszczu. 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,

- 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].

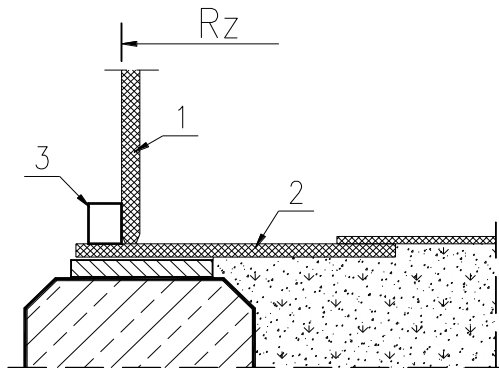
W metodzie arkuszowej scalenia konstrukcji dokonuje się na przygotowanym i odebranym przez nadzór fundamencie - szczególnie ważne są pomiary niwelety górnej powierzchni żelbetowego pierścienia fundamentowego oraz stopnia zagęszczenia poduszki piaskowej. Rola tych dwóch parametrów zostanie przedstawiona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

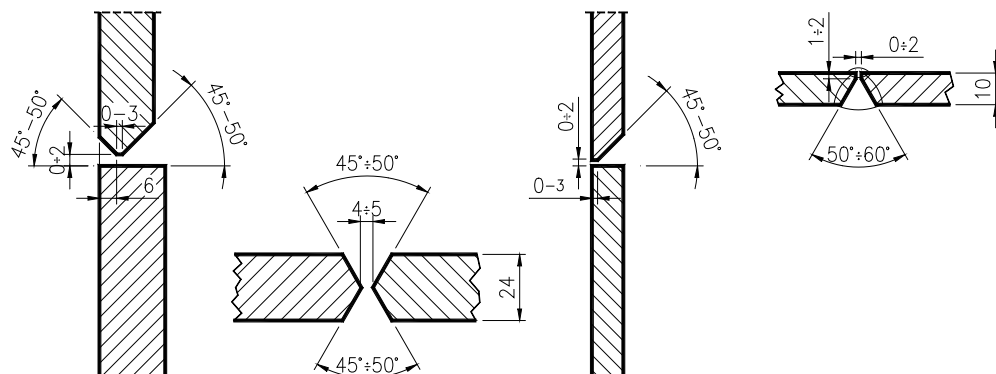
innym niedokładności wymiarowych poszczególnych arkuszy stosuje się blachy zamykające z naddatkiem. Arkusze zamykające dostarczane są z naddatkiem 300 - 500 mm, a ich dopasowanie wykonuje się bezpośrednio na montażu. Górną krawędź płaszczu zwieńcza się kątownikiem, zaś na ostatnim pierścieniu montuje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

This is a post-print of: PhD Thesis, Politechnika Gdańska, 2004.

Kowalski D. „Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej”, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.

a)



b)



Rys. 4. 11. Osprzęt montażowy

a) rusztowanie przejezdne, b) montaż z wykorzystaniem żurawia samobieżnego

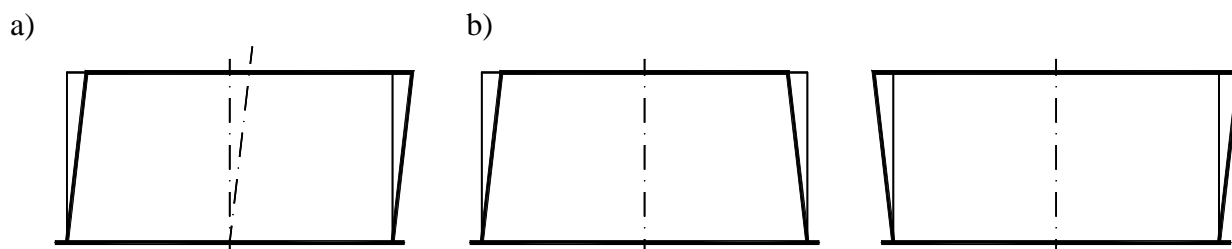
5. Imperfekcje geometryczne powłok walcowych

5.1. Rodzaje imperfekcji

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

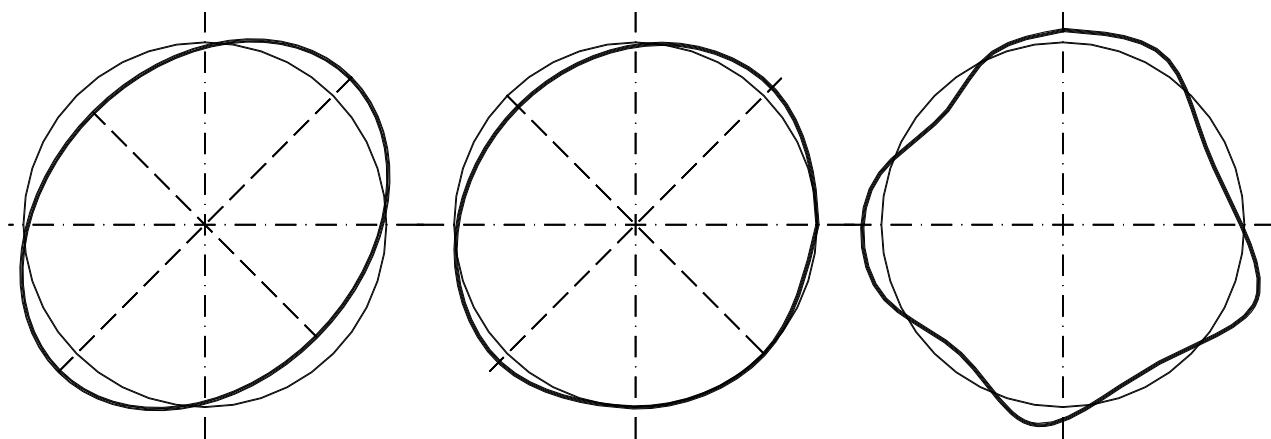
- 1) przechylenie walcowego płaszczu zbiornika,
- 2) stożkowy przebieg powierzchni pobocznicy,
- 3) owalizacja przekroju na poszczególnych poziomach,
- 4) deformacje kątowe spawanych styków pionowych pomiędzy blachami tworzącymi poszczególne pierścienie,
- 5) deformacje kątowe spawanych styków poziomych – 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).

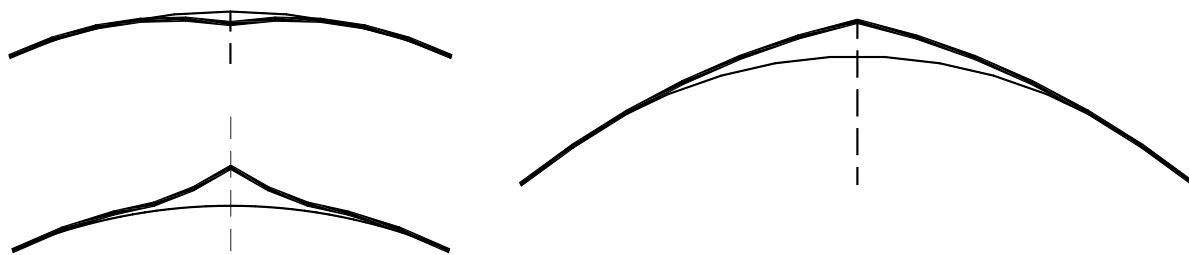


Rys. 5. 1. Odształcenia ogólne formy zbiornika

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



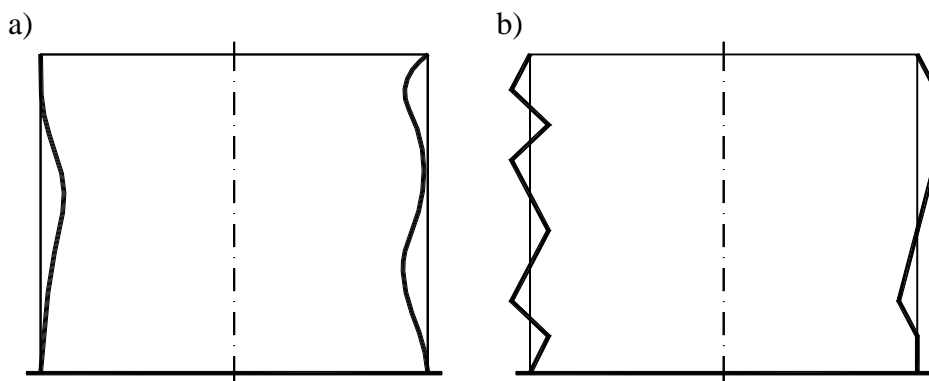
Rys. 5. 2. Owalizacja przekroju na poszczególnych poziomach



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

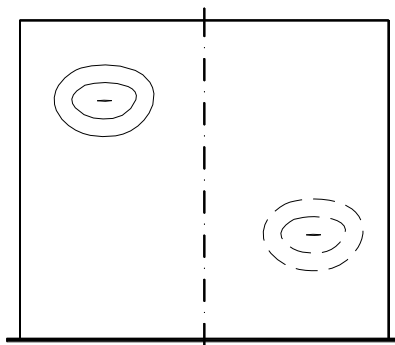


Rys. 5. 4. Deformacje kątowe spawanych styków poziomych



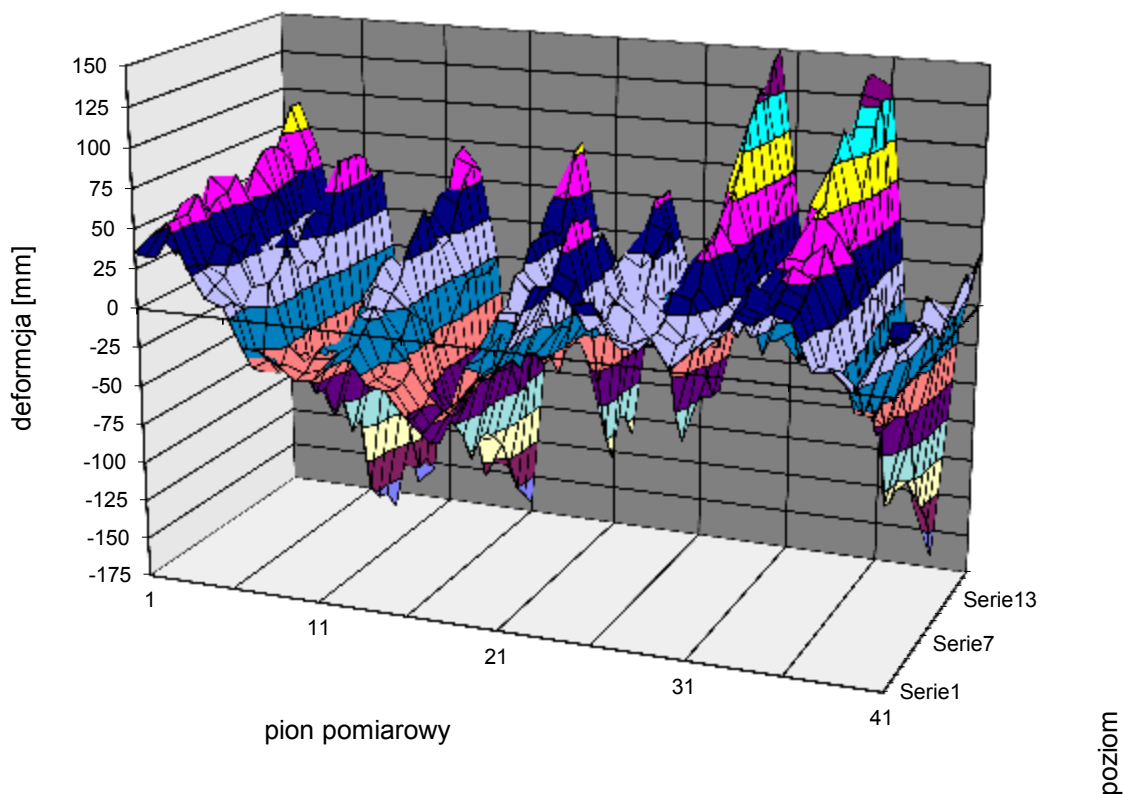
Rys. 5. 5. Imperfekcje tworzącej

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 płaszczu 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 płaszczu zbiornika



Rys. 5. 8. Przykłady deformacji

Imperfekcje geometryczne powłoki płaszczu zbiornika powstają w dwóch okresach:

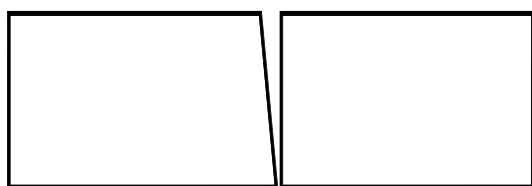
- 1) w okresie przygotowania elementów składowych potrzebnych do budowy zbiornika i wykonawstwo robót montażowych, co można łącznie określić mianem – okresu budowy,
- 2) w okresie eksploatacji zbiornika i niejednokrotnie pojawiający się w jego trakcie, a rozłożony w czasie, proces nierównomiernego osiadania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

5.2. Imperfekcje powstałe w okresie budowy zbiornika

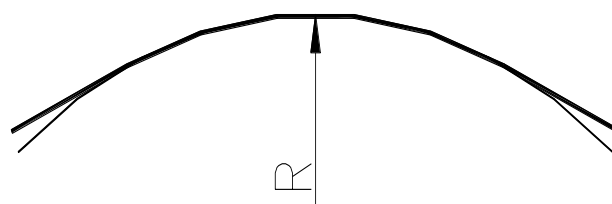
Podstawowymi przyczynami wstępnych imperfekcji kształtu na etapie realizacji obiektu są:

- 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 arkusza blach

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.

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 płaszczu 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.

This is a post-print of: PhD Thesis, Politechnika Gdańska, 2004.

Kowalski D. „Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej”, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.

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

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 płaszczu 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

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 weibullowski 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 określania nośności krytycznej dla powłok z imperfekcjami. [6-85].

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. Analizę 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 osiadaniami zbiorników a zmianą stanu deformacji płaszczu, niejednokrotnie uniemożliwiające normalne i bezpieczne eksploataowanie obiektu. Stwierdzono wówczas, iż osiadaniami 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 osiadaniami 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 harmonicznym 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

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].

Poziom bezpieczeństwa obiektu związany jest nie tylko z odpowiednim doбором 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

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:

- 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

This is a post-print of: PhD Thesis, Politechnika Gdańska, 2004.

Kowalski D. „Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej”, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.

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 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 płaszczu zbiornika

L.p.	Opis odchyłki	Dopuszczalna wartość imperfekcji wg normy						
		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 mm
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 płaszczu	± 30 mm	$\pm 0,0020 \cdot D$					± 80 mm
6	Strzałka odchylenia tworzącej płaszczu od pionu	$\pm 0,0050 \cdot h$	$\pm 0,0045 \cdot h$	$\pm 0,0050 \cdot h$				$\pm 0,0050 \cdot h$ max ± 80 mm
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 płaszczu zbiornika,
h - wysokość płaszczu zbiornika

BIBLIOGRAPHY

- [1] Abramek W., Centkowski J., i inni : Analiza bezpieczeństwa żelbetowych chłodni kominowych z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych. Inżynieria i Budownictwo, 6/1993r., Warszawa,
- [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.,
- [3] API Standard 650 – Welded Steel Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute
- [4] Baczyński Z., Janas M.: Zagadnienia stateczności zbiorników stalowych na ciecze. Prace IPPT PAN, Warszawa, nr 26/1969
- [5] 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 Politechniki Gdańska, Gdańsk 2002r.,
- [6] 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,
- [7] Biegus A., Hołała E.: Nośność graniczna uszkodzonych korozyjnie zbiorników stalowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 11/1999, Warszawa
- [8] Bileckij S.M., Barwinko J.P., Golińko W.M.: Ocena niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej cylindrycznych zbiorników stalowych z deformacjami płaszcza. Inżynieria i Budownictwo, 12/1991r., Warszawa,
- [9] Biuro Projektów CPN „Naftoprojekt”: Dokumentacje projektowe typowych zbiorników z dachami stałymi i pływającymi. Wg Ziółko J.
- [10] Biuro Projektów CPN „Naftoprojekt”: Dokumentacje projektowe zbiorników z dachami pływającymi o pojemności $V=50.000$ m³ – Warszawa,
- [11] Błaszczak G.: Wybrane zagadnienia wykonawstwa konstrukcji zbiorników. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [12] Brandt S.: Analiza danych. WN PWN, Warszawa 1998,
- [13] BS 2654 :1984 – British Standard Specification for Manufacture of vertical steel welded storage tank with butt welded shells for the petroleum industry
- [14] Chróścielewski J., Wismur 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.,
- [15] DIN 18800 Teil IV – Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Schaleulen,
- [16] DIN 4119 Teil 1 Jun 1979 – Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen, Grundlagen, Ausführung, Prüfungen,
- [17] DIN 4119 Teil 2 Feb 1980 – Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen, Berechnung,
- [18] 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.,
- [19] ECCS, European recommendations for steel construction. Buckling of shells, Publication No 56, 1988.
- [20] EN 1993-1-6:2004 - Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.6: General Rules: Strength and Stability of Shell Structures.
- [21] Filipow E., Wekezer J., Wilde P.: Stochastyczny model odchyłek powierzchni zbiorników cylindrycznych. Zeszyt PTMTS – Gliwice i Politechniki Śląskiej nr 7, 1973r.,
- [22] Filipow E.: Analiza numeryczna płaskich zagadnień teorii sprężystości z uwzględnieniem losowych pól odchyłek. Praca doktorska Instytut Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej,

- [23] Filipow E.: Generowanie losowych odchyłek początkowych powłok zbiorników walcowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 204, Budownictwo Lądowe XXV, Wydawnictwo Uczelniane PG, Gdańsk 1973r.,
- [24] Flügge W.: Powłoki - obliczenia statyczne. Arkady, Warszawa 1972r.,
- [25] Girkmann K.: Dźwigary powierzchniowe, wstęp do elastoplastyki tarcz, płyt, powłok i tarczownic. Arkady Warszawa, 1957r.,
- [26] Gołaś J., Kasperski Z.: Numeryczna analiza statyczna powłok obrotowych metodą elementów skończonych. Archiwum Inżynierii Lądowej 1973r.,
- [27] Gołaś J., Kasperski Z.: Obliczenia numeryczne powłok obrotowych metodą elementów skończonych. PWN, Warszawa-Wrocław 1978r.,
- [28] Gołaś 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.,
- [29] Gołaś J.: Rozwiązania zagadnień statycznych powłok obrotowych przy zastosowaniu metod elementów skończonych. Rozprawy Inżynierskie 25, PAN, IPPT, Warszawa 1977r.,
- [30] Gołaś J.: Uwzględnienie odchyłek geometrycznych w analizie statecznej powłok obrotowych. XXV Jubileuszowa Konferencja Naukowa KILiW i KN PZITB, Wrocław-Krynica, 1979r.,
- [31] Górski J., Jasina M.: Identyfikacja i symulacja imperfekcji geometrycznych płyt. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 585, Budownictwo Lądowe LVI, Gdańsk 2001r.,
- [32] Górski J.: Simulation-based nonlinear analysis of imperfect structures. Archiwum Inżynierii Lądowej, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001r.,
- [33] Grzebalski J.: Wyniki badań zbiorników cylindrycznych po 30-letniej eksploatacji. Materiały, seminarium, „Jakość naziemnych zbiorników w eksploatacji”, Zakopane 1995r.,
- [34] Gwizdała S.: Zagadnienia dotyczące posadowienia zbiorników na paliwa płynne. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [35] 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.,
- [36] 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.,
- [37] 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,
- [38] 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.,
- [39] 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.,
- [40] Jewstafiew Wł.: Stan naprężeń i deformacje poboczniczy zbiornika pod wpływem nierównomiernego osiadania. Sesja naukowa PG, 35 lat WBL, Gdańsk, VI 1980r.,
- [41] 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.,
- [42] 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.,
- [43] Jonaidi M., Ansourian P.: Non-Linear behavior of storage tank shells under harmonic edge settlement. International Conference on Carrying Capacity of Steel Shell Structures, 1-3.10.1997r. Brno

- [44] Kalisz H.: Rozkład sił wewnętrznych w zbiornikach cylindrycznych z uwzględnieniem sprężystego oddziaływania gruntu. XXVII Konferencja Naukowa KILiW i Komitetu Nauki PZITB, Warszawa-Krynica 1981r.,
- [45] Katanow A. A., Popowski B. W.: Techniczne rozwiązanie zbiorników i komputerowe modelowanie naprężeniowo - odkształceniowe rzeczywistych defektów konstrukcji. *Montažnyje i Spetsialnyje Raboty w Stroitelstwie*, 7-8/1998r.
- [46] Kielawa J.: Niektóre problemy projektowania spawanych zbiorników niskociśnieniowych dużych pojemności. *Przegląd Spawalnictwa XXVIII*, 4/1976r., Warszawa,
- [47] Klonecki W.: Statystyka dla inżynierów. WN PWN, Warszawa 1999,
- [48] Konderla P.: Nieliniowe rozwiązanie powłoki o kształcie hiperboloidy jednopowłokowej. część. I., Obciążenie osiowo-symetryczne, *Archiwum Inżynierii Lądowej*, 1973r.,
- [49] Konderla P.: Nieliniowe rozwiązanie powłoki o kształcie hiperboloidy jednopowłokowej. część. II., Obciążenie niesymetryczne, *Archiwum Inżynierii Lądowej*, 1974r.,
- [50] Konderla P.: Rozwiązanie powłoki o kształcie hiperboloidy jednopowłokowej za pomocą metody elementów skończonych. *Archiwum Inżynierii Lądowej*, 1973r.,
- [51] Kordecki Z., Pytel E.: Wpływ niedokładności kształtu poboczniczy zbiornika walcowego na wartości sił wewnętrznych. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 4/1979, Warszawa,
- [52] Kowalski D.: Badania tensometryczne płaszcza zbiornika z imperfekcjami kształtu. *Badania materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2004, pp. 393–400.
- [53] Kowalski D.: Badania tensometryczne stalowych płaszczy zbiorników z imperfekcjami kształtu. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Konstrukcje Metalowe – Gdańsk 2001. Gdańsk, 6-8.06.2001, pp. 127–134.
- [54] Kowalski D.: Correctness of work execution in tank construction in statistics. 19th Czech and Slovak International Conference Steel Structures and Bridges 2000. Strbske Pleso, 2000, pp. 429–433.
- [55] Kowalski D.: Dokładność wykonawstwa konstrukcji zbiornikowych w ujęciu statystycznym i wytrzymałościowym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 585, Budownictwo Lądowe LVI*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001, pp. 149–156.
- [56] Kowalski D.: Jakościowa i ilościowa ocena odchyłek wykonania płaszczy zbiorników stalowych. Konferencja: Problemy eksploatacyjne baz magazynowych produktów naftowych, Poznań 11-11-12 maja 1999, pp. 1-10.
- [57] Kowalski D.: Naprężenia w płaszczy zbiornika stalowego z lokalnymi deformacjami. *Inżynieria i Budownictwo*, vol. 57, nr 6, 2001, p. 351-353.
- [58] Kowalski D.: Ocena kosztów wykonania cylindrycznego zbiornika na paliwa w zależności od gatunków stali i wymiarów blach. *Inżynieria i Budownictwo*, vol. 53, nr 7, 1997, pp. 379-381.
- [59] Kowalski D.: Stresses in the tank shell with shape deformation. *Proceedings of the International Conference on Design, Inspection, Maintenance and Operation of cylindrical steel tanks and Pipelines*. Prague - Kralupy nad Vltavou, Czech Republic, 8-11 October 2003, pp. 143–147.
- [60] 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.,
- [61] Křupka V.: Shell-to-base joint study of vertical cylindrical tanks. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 585, Budownictwo Lądowe LVI*, Gdańsk 2001r.,
- [62] Kubik L. T.: Zastosowanie elementarnego rachunku prawdopodobieństwa do wnioskowania statystycznego. WN PWN, Warszawa 1998,
- [63] Lessig E., Liliejew A., Sokołow A.: *Listowye metaliczeskije konstrukcji*. Izdatelstwo Literatury po Stritelstwie, Moskwa 1970r.,
- [64] Lundgren H.: *Powłoki walcowe*. Arkady, Warszawa 1963r.,
- [65] Łapko A.: *Nomogramy do obliczania sił wewnętrznych w walcowych zbiornikach obciążonych symetrycznie*. *Inżynieria i Budownictwo* 12/1990r., Warszawa,

- [66] 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 .
- [67] MacNeal R.H.: Perspektive on finite elements for shell analysis. Elsevier, Finite Elements in Analysis and Design nr 30, 1998r .
- [68] Mazurkiewicz Z., Pieńczykowski L.: Obrotowo symetryczne zginanie powłoki cylindrycznej o zmiennej sztywności. Archiwum Inżynierii Lądowej, Warszawa 1973r.,
- [69] Mazurkiewicz Z.E., Nagórski R.: Powłoki obrotowe sprężyste. PWN, Warszawa 1987r.,
- [70] McGrath R.V.: New concepts for storage tank design. Hydrocarbon Processing, 5-1976r.
- [71] Mendera Z.: Interakcja niestateczności sprężystej i plastycznej w powłokach walcowych z imperfekcjami. Archiwum Inżynierii Lądowej, PWN, Warszawa, 1987r.,
- [72] Mendera Z.: Normalizacja warunku stateczności powłok walcowych i kulistych. Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna Konstrukcje Metalowe, Gdańsk 1984r.
- [73] 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.,
- [74] Mendera Z.: Stateczność stalowych powłok walcowych ściskanych podłużnie. Inżynieria i Budownictwo, 4-5/2000, Warszawa,
- [75] Mendera Z.: W sprawie stateczności metalowych powłok walcowych ściskanych podłużnie. XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław-Krynica 1999r.
- [76] Menyhard I.: Konstrukcje powłokowe – obliczenia statyczne i kształtowanie. Arkady, Warszawa 1971r.,
- [77] Morawski T., Wichtowski B.: Badania uszkodzeń korozyjnych stalowych zbiorników naziemnych wg przepisów API 653. Inżynieria i Budownictwo, 5/1997r., Warszawa,
- [78] Morawski T.: Badania i naprawy zbiorników naziemnych – wymagania normy API 653. Materiały, seminarium, „Jakość naziemnych zbiorników w eksploatacji”, Zakopane 1995r.,
- [79] Morawski T.: Stan techniczny eksploatowanych zbiorników naziemnych. materiały, seminarium, „Jakość naziemnych zbiorników w eksploatacji”, Zakopane 1995r.,
- [80] MSC/Nastran for Windows 2001 - program obliczeniowy z instrukcjami obsługi i podręcznikami użytkownika: User's Guide, 1999r. USA,
- [81] Murzewski J.: Niezawodność konstrukcji inżynierskich. Arkady, Warszawa 1989r.,
- [82] Murzewski J.: Bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych. Arkady, Warszawa 1970r.,
- [83] Nowacki W.: Dźwigary powierzchniowe. PWN, Warszawa 1979r.
- [84] 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.,
- [85] Orlik G.: Statystyczne własności technologiczne nieprawidłowości kształtu stalowych zbiorników cylindrycznych. Archiwum Inżynierii Lądowej, zeszyt 2, Warszawa 1974r.,
- [86] 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.,
- [87] 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.,
- [88] PN-81/B-03210 - Konstrukcje stalowe. Zbiorniki walcowe pionowe na ciecze. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [89] PN-84/B-06210 – Konstrukcje stalowe – Zbiorniki walcowe pionowe na ciecze – Wymagania i badania.
- [90] PN-B-03210:1997 - Konstrukcje stalowe, Zbiorniki walcowe pionowe na ciecze, Projektowanie i wykonanie.
- [91] PN-B-03264:2002 – Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie,
- [92] Ponomariew K.: Odchylenia geometrycznej formy pionowych zbiorników cylindrycznych. Azerbejdżańskoje, Nieftianoje Chozjajstwo, nr 8/1956r.,

- [93] Ponomariew K.: Odształcenia miejscowe w powłokach stalowych zbiorników walcowych. Inżynieria i Budownictwo, 04/1959r., Warszawa,
- [94] Radwańska M.: Analiza stateczności i dużych przemieszczeń ustrojów powierzchniowych za pomocą MES. monografia 105, Politechnika Krakowska, Kraków 1990r.,
- [95] Roliński Z.: tensometria oporowa. WNT, Warszawa 1981r.,
- [96] Runge C.: Über die Formänderung eines zylindrischen Wasserbehälters durch den Wasserdruck. Z. MATH. Phys. 1904r.,
- [97] 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.,
- [98] Schneider P.: Zusätzliche Beanspruchungen vertikaler durch ungleichmäßige rotationsymmetrische Fundamentabsenkungen. Stahlbau 62/1993, heft 9, Berlin,
- [99] 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.,
- [100] 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.,
- [101] 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,
- [102] Sobczyk M.: Statystyka. WN PWN, Warszawa 1998,
- [103] Szechiński M., Siwiec P.: Wpływ deformacji powłoki chłodni kominowej na obciążenie wiatrem. Inżynieria i Budownictwo, 3/1997, Warszawa
- [104] TGL 13503/1 - Stahlbau, Stabilität von Stahlregwerken. Grundlagen, DDR, Standard, 1982r.,
- [105] Timoshenko S.: Teoria sprężystości. Arkady, Warszawa 1962r.,
- [106] Timoshenko S.P.; Gere J.M.: Teoria stateczności sprężystej, Arkady, Warszawa 1963r.,
- [107] Waszczyszyn Z., Bartczak M.: Neuronowa predykcja obciążeń krytycznych ściskanych powłok cylindrycznych z imperfekcjami geometrycznymi. Konferencja Naukowa KILiW i Komitetu Nauki PZITB, Opole-Krynica 2001r.,
- [108] Waszczyszyn Z., Cichoń C. Radwańska M.: Metody elementów skończonych w stateczności konstrukcji. Arkady, Warszawa 1990r.,
- [109] Waszczywyszyn 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.,
- [110] Wilde P., Orlik G.: Symulacja ciągu losowego na EMC w zastosowaniu do analizy odchyłek pobocznic zbiorników cylindrycznych. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [111] Wilde P., Sawicki A., Matulewicz Z.: Numeryczna analiza stateczności płaszcza zbiornika w ramach nieliniowej teorii powłok. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania, Projektowanie, Wykonawstwo i Eksploatacja Zbiorników na Paliwa Płynne, Gdańsk 1975r.,
- [112] Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa 1987r.,
- [113] Własow W. Z.: Obszczaja teoria obołoczek i ej prilożenie w technike. Moskwa, 1949r.,
- [114] Wojewódzki W.: Nośność graniczna powłok. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002r.,
- [115] Wojnowski W., Wirkowski Cz.: Analiza zmęczenia niskocyklowego na przykładzie konstrukcji zbiornika wieżowego. Konstrukcje stalowe, 4(18), październik 1997r., Warszawa,
- [116] Wojnowski W.: Analiza metod określania wytrzymałości materiału w spoinie czołowej przy niskocyklowym obciążeniu. Inżynieria i Budownictwo, 2/2000, Warszawa
- [117] Wolmir A.S.: Ustoicziwost deformirujemych sistem, Nauka, Moskwa 1967r.,

- [118] Ziemmermann R.: Pomiary naprężeń i drgań metodami elektrycznymi. PWT, Warszawa 1959r.,
- [119] Ziółko J., Jewstafiew Wł.: Analiza stanu naprężeń w pobocznicy zbiornika przy nierównomiernym jego osiadaniu. Opracowanie naukowe, Instytut Konstrukcji Budowlanych WBL PG, Gdańsk 1979r.,
- [120] Ziółko J., Kielawa J.: Ocena konstrukcji prototypowego zbiornika z dachem pływającym po 22 latach eksploatacji. Inżynieria i Budownictwo, 10/1983r., Warszawa,
- [121] Ziółko J., Kowalski W.: Zagadnienia technologiczne przy korekcie kształtu płaszczy 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.,
- [122] Ziółko J., Mikulski T.: Analiza połączeniu płaszcza z dnem w stalowym zbiorniku posadowionym na skokowo zmiennym podłożu. XLI Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Kraków krynica 1995r.,
- [123] Ziółko J., Mikulski T.: Analiza rozkładu sił wewnętrznych w połączeniu płaszcza z dnem w stalowym zbiorniku o zdeformowanym obwodzie dna. Zeszytu Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe L, nr 520, Gdańsk, 1995r.,
- [124] Ziółko J., Orlik G.: Montaż konstrukcji stalowych. Arkady, Warszawa 1980r.,
- [125] Ziółko J.: Analiza korozyjnych uszkodzeń zbiorników stalowych na paliwa płynne. Inżynieria i Budownictwo, 11/1985, Warszawa,
- [126] Ziółko J.: Formkorrektur Mäntel zylindrischer Stahlbehälter. Stahlbau 62/1993, heft 5, Berlin,
- [127] Ziółko J.: Imperfekcje stalowych zbiorników walcowych – przyczyny ich powstawania, sposób ograniczania. Inżynieria i Budownictwo, nr 11/1999, Warszawa,
- [128] Ziółko J.: Instandsetzung am verformten Mantel eines zylindrischen Stahlbehälters. Stahlbau 62/1993, heft 6, Berlin,
- [129] Ziółko J.: Korekta kształtu płaszcza cylindrycznego zbiornika stalowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej Budownictwo Lądowe L1, nr 522, Gdańsk 1995r., (Inżynieria i Budownictwo 11/1992, Warszawa),
- [130] Ziółko J.: Kruche pęknięcia płaszczy zbiorników stalowych. Politechnika Gdańska, Gdańsk 1990r.,
- [131] Ziółko J.: Naprawa podziemnego zbiornika stalowego. Inżynieria i Budownictwo, 12/1991, Warszawa
- [132] Ziółko J.: Naprawa uszkodzonych stalowych zbiorników cylindrycznych. Przegląd Spawalnictwa XXVIII, 4/1976r., Warszawa,
- [133] Ziółko J.: Naprawy dachów i płaszczy zbiorników stalowych zdeformowanych w wyniku działania podciśnienia.
- [134] Ziółko J.: Remonty i wzmocnienia zbiorników stalowych. XV Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 23-26.02.2000r.,
- [135] Ziółko J.: Reparatur von Dächern und Mänteln durch Unterdruck verformter Stahltanks. Stahlbau, 70/2001, heft 5, Berlin,
- [136] Ziółko J.: Reparatur von Schweißnähten während des Betriebs eines Tanks mit Schwimmdach. Stahlbau 59/1990, heft 6, Berlin
- [137] 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.,
- [138] 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.,
- [139] 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.,

- [140] Ziółko J.: Zabezpieczenia środowiska naturalnego przed skażeniem wywołanym eksploatacją zbiorników i rurociągów naftowych. Konstrukcje stalowe nr 3-4/2002r, Warszawa,
- [141] Ziółko J.: Zbiorniki metalowe na cieczy i gazy. Arkady, Warszawa 1986r.,
- [142] Ziółko J.: Zbiorniki stalowe z pływającymi dachami. Inżynieria i Budownictwo, 12/1960r., Warszawa,

For Citation:

PL:

Kowalski D. „Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej”, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.

EN:

Kowalski D. „Influence of initial imperfections on the vertical tank side stresses. PhD Thesis. Gdańsk University of Technology, Gdańsk, 2004.

<http://depot.ceon.pl/handle/123456789/1231>