

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

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. Gdansk University of Technology, Gdansk, 2004.

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

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. Osiedlanie 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. Pomiary 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

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. Walcove 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.

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 cieczy. 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 Gdańskiej, 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., Hotała 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 $V=50.000 \text{ m}^3$ – 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 odchyłeń. 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 pobocznicy 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 pobocznicy 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 pobocznicy 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 pobocznicy 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 Spicialnyje 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 płaszczu zbiornika z imperfekcjami kształtu”, Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2004, pp. 393–400.
- [53] **Kowalski D.:** „Badania tensometryczne stalowych płaszczu zbiorników z imperfekcjami kształtu”, X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Konstrukcje Metalowe, Gdańsk, 6-8 czerwca 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, Strbske Pleso, Vysoke Tatry, Slovenska Republika, September 27-30, 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, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2001, pp. 149–156.
- [56] **Kowalski D.:** „Jakościowa i ilościowa ocena odchyłek wykonania płaszczu zbiorników stalowych”, *Problemy eksploatacyjne baz magazynowych produktów naftowych*, Poznań, 11-12 maja 1999, pp. 1-10.
- [57] **Kowalski D.:** „Naprężenia w płaszczu 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 pobocznic 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. Azerbejdżańskie, Nieftianoje Chozjajstwo, nr 8/1956r.,
- [93] Ponomariew K.: Odkształcenia 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 uwzględnieniem 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] 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.,
- [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 płaszczy 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 wyężenia materiału w spoinie czołowej przy niskocyklowym obciążeniu. Inżynieria i Budownictwo, 2/2000, Warszawa

- [117] Wolmir A.S.: Ustojczivost deformirujemych sistem, Nauka, Moskwa 1967r.,
- [118] Ziemmermann R.: Pomiaru 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 ciecze i gazy. Arkady, Warszawa 1986r.,
- [142] Ziółko J.: Zbiorniki stalowe z pływającymi dachami. Inżynieria i Budownictwo, 12/1960r., Warszawa,

Badania materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich,