

O wpływie imperfekcji geometrycznych na stan naprężenia w powłokach walcowych

Kowalski Dariusz

Politechnika Gdańska, Gdańsk, Polska

Inżynieria i Budownictwo, vol. 60, nr 11, 2004, pp. 611-614

Abstrakt: Przedstawiono wyniki numerycznych analiz płaszczy zbiorników magazynowych pojemności 50 000 m³ z imperfekcjami kształtu. Wyniki analiz były weryfikowane badaniami tensometrycznymi na rzeczywistym zbiorniku. Stwierdzono, iż rzeczywiste imperfekcje geometryczne płaszczy zbiorników są powodem wzrostu naprężeń dochodzących nawet do 30%

On influence of geometrical imperfections on stress level in cylindrical shell

Abstract: In the paper results of numerical analysis of shell of storage tanks of 50 000 m³ capacity with shape imperfections are presented. Results were verified by tensometric test performed on the real tank. It was recognized that real geometrical imperfections cause increase of stresses in the tank construction by 30%.

W artykule przedstawiono wyniki analizy wpływu imperfekcji geometrycznych w płaszczyznach zbiorników stalowych na cieczy. Analiza dotyczy w szczególności zbiorników magazynowych o osi pionowej, z dachem pływającym, o pojemności nominalnej 50000 m³, wykorzystywanych do przechowywania produktów naftowych [1].

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

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

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

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

Konstrukcja zbiorników

Zasadniczymi elementami konstrukcji analizowanego typu zbiornika jest stalowe dno oraz płaszczyzna (rys. 1). Dno zbiornika składa się z dwóch części: środkowej i pierścienia obrzeżnego. Część środkowa stalowego dna, jest

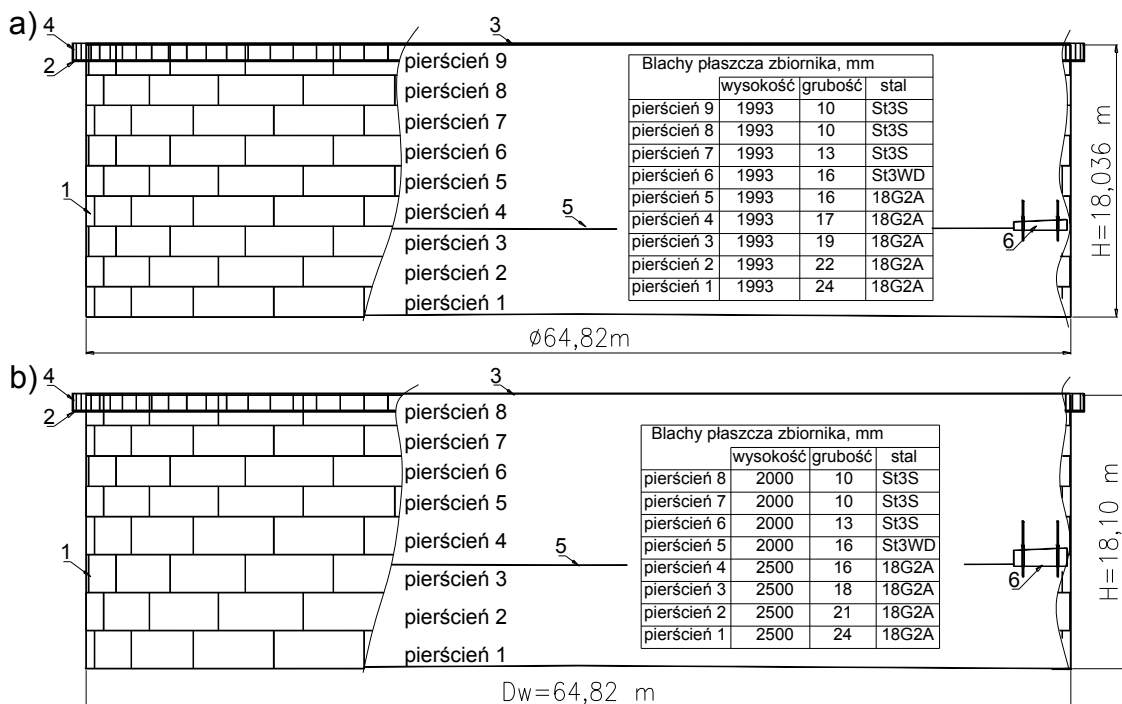
wykonana z blach grubości 8 mm . Blachy te są ułożone bezpośrednio na fundamencie piaskowym. Ta część dna zbiornika jest otoczona pierścieniem obrzeżnym, z blach grubości 16 mm . Pierścień ten spoczywa na fundamencie piaskowym w swojej części wewnętrznej, na obwodzie zewnętrznym - na żelbetowym pierścieniu fundamentowym (rys. 2). Blachy dna są łączone w stykach poprzecznych spoinami czołowymi z zastosowaniem podkładek, styki podłużne są wykonane na zakład z zastosowaniem spoin pachwinowych. Część środkowa dna zbiornika z pierścieniem obrzeżnym jest łączona na zakład spoiną pachwinową. Dno zbiornika wykonano z dwóch gatunków stali: część środkową ze stali niestopowej znaku St3SY, a część zewnętrzną - ze stali niskostopowej znaku 18G2A.

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

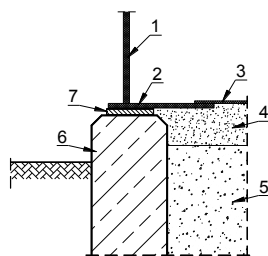
- niskostopową znaku 18G2A - na cztery dolne pierścienie płaszcza,
- niestopową znaku St3S - na wyższe pierścienie płaszcza.

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

Występują również inne elementy, które są związane z wyposażeniem technologicznym, Można tu wymienić: włazy - wejściowe, wyczystkowe, wentylacyjne, króćce - produktowe, pomiarowe, oraz elementy zapewniające odpowiednie ciągi komunikacyjne – schody, drabiny, pomosty.



Rys. 1. Konstrukcja analizowanych zbiorników: a) płaszcz z 9 pierścieni poziomych, b) płaszcz z 8 pierścieni poziomych, 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,



Rys. 2. Konstrukcja fundamentu:

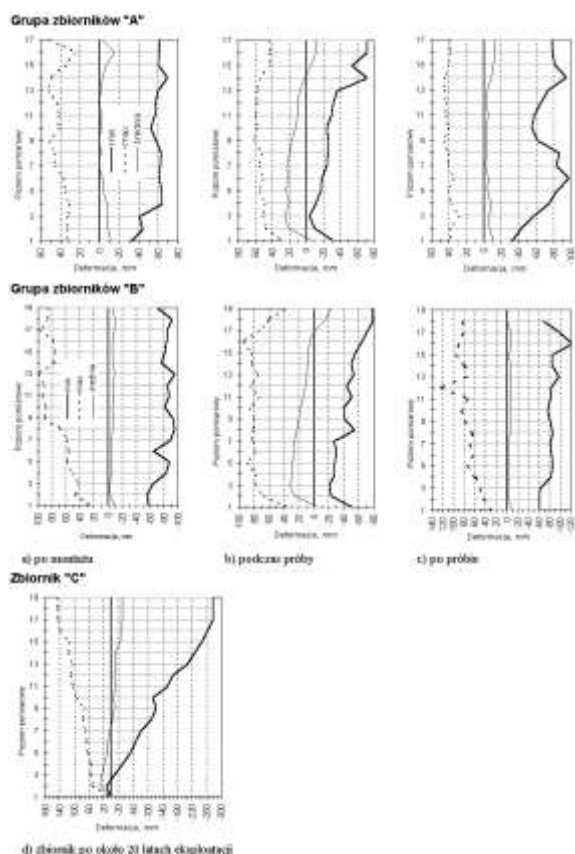
1 – płaszcz zbiornika, 2 – pierścień obrzeżny dna, 3 – wewnętrzna część dna stalowego, 4 – poduszka piaskowa nasączona olejem, 5 – fundament żwirowo – piaskowy, 6 – pierścień żelbetowy, 7 – elastyczna przekładka

Stan deformacji płaszczy zbiorników

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

- bezpośrednio po zakończeniu prac montażowych,
- w czasie próby wodnej, zbiornika wypełnionego wodą do poziomu eksploatacyjnego,
- po zakończeniu próby wodnej, czyli po jednokrotnym pełnym napełnieniu zbiornika.

W analizie wykorzystano wyniki pomiarów dwunastu nowych zbiorników oraz jednego zbiornika eksploatowanego ponad 20 lat. Na rysunku 3 przedstawiono wykresy obwiedni geometrycznych imperfekcji płaszczy zbiorników. Wartości tych obwiedni podano jako odchyłki od zakładanej w projekcie geometrii idealnej. Prezentowane wartości zostały zgrupowane ze względu na niewielkie różnice czasu budowy (A, B) oraz okresu wykonania pomiarów (C). Ilościowy rozkład wartości imperfekcji geometrycznych zbiorników podano w pracach [3, 4, 5].

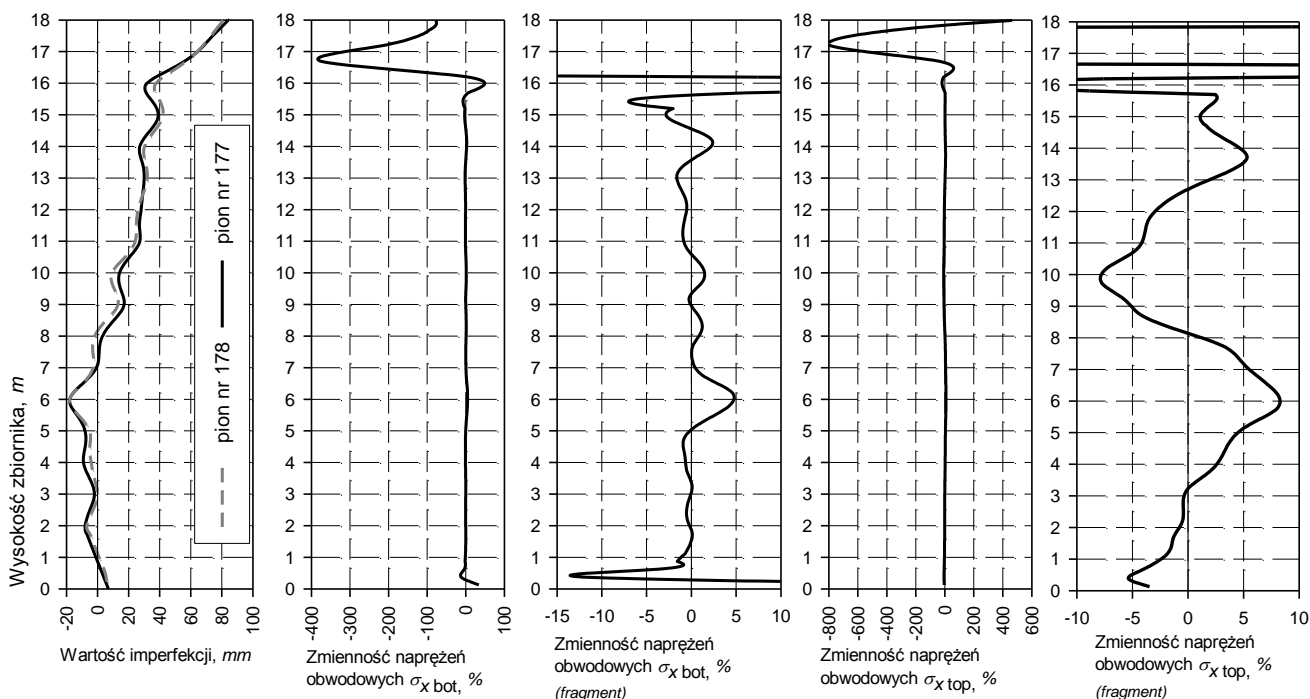


Rys. 3. Obwiednie geometrycznych imperfekcji płaszczy zbiorników

Obliczenia numeryczne zbiorników z imperfekcjami

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

Analizę zmienności rozkładu sił wewnętrznych oraz wynikających stąd zmian rozkładu naprężeń przeprowadzono oddzielnie do każdego zbiornika. Imperfekcje geometryczne zbiornika oraz ich wpływ na analizowane stany potraktowano globalnie w celu określenia obwiedni poszukiwanych wielkości statycznych i wytrzymałościowych. Analiza indywidualna każdej pojedynczej imperfekcji czy też każdego pionu lub poziomu na stan zbiornika jest bardzo trudna z powodu różnego ukształtowania otoczenia danej wady geometrycznej. Aby to zobrazować przedstawiono przykładowe zestawienia rozkładów naprężeń (rys. 4) w losowo wybranym zbiorniku. Pionowe pasmo podziału elementowego płaszcza zbiornika zostało dobrane w sposób losowy. W celu uchwycenia szczegółów zmienności analizowanych rozkładów, niektóre wielkości przedstawiono na dwóch wykresach. Na jednym zilustrowano cały zakres zmienności danej wielkości. Takie zestawienie pozwala na zobrazowanie zmienności analizowanych wielkości w układzie całego ich zakresu jak i wybranych fragmentów, które są słabo przedstawione na wykresie obejmującym pełen zakres zmienności prezentowanej wielkości. Stan deformacji powłoki odpowiadający warunkom geometrycznym na krawędziach pionowych wybranego pionowego pasma elementowego został przedstawiony jako pierwszy wykres. Krzywa ciągła tego wykresu przedstawia warunki początkowe, przerywana - końcowe brzegowe warunki geometryczne siatki podziału elementowego wybranego pasma.



Rys. 4. Zestawienie rozkładu naprężeń (bot - powierzchnia zewnętrzna, top – wewnętrzna)

Wyniki analizy zakresu zmienności analizowanych wielkości poszczególnych zbiorników są kolejnym etapem oceny zmian powodowanych przez imperfekcje. Przykładowe wykresy prezentowane na rysunku 5 opracowano na

podstawie różnicy wartości maksymalnych i minimalnych z obwiedni poszczególnych wielkości, w stosunku do wartości wzorcowej wg wzoru:

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

w którym:

- X_{\min} , X_{\max} – odpowiednio minimalna i maksymalna wartość analizowanej wielkości statycznej określonej na poszczególnych obliczeniowych poziomach,
 $X_{\text{wzór}}$ – wielkość wzorcową na poszczególnych poziomach obliczeniowych dotyczącą zbiornika bez imperfekcji geometrycznych,

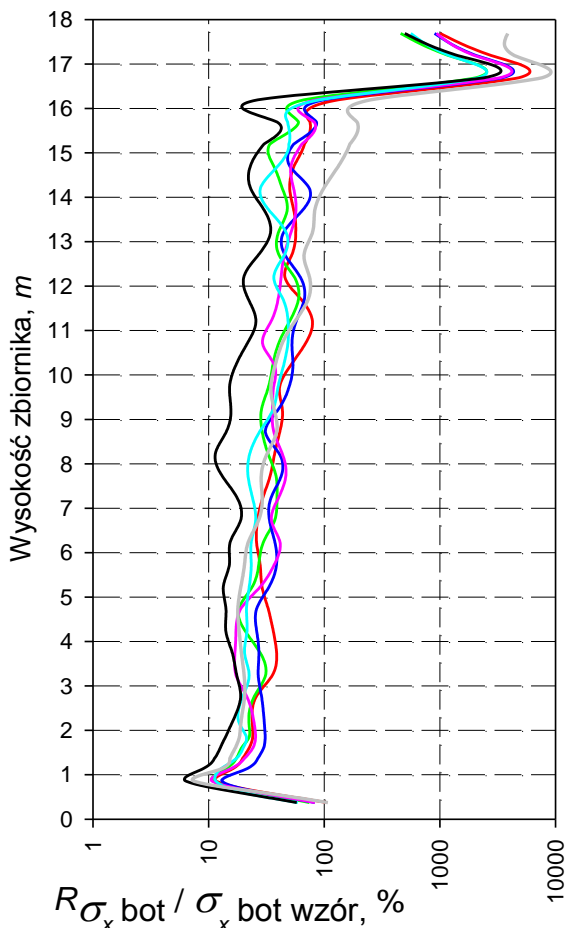
Przedstawione na rys. 5 oraz tablicach 1 i 2 procentowe zakresy zmienności naprężeń i sił wewnętrznych wskazują na ogólną tendencję zwiększania ich wartości wraz z wysokością zbiornika. Odpowiada to faktowi zwiększenia się zakresów zmienności odchyłek geometrycznych płaszcza wraz z jego wysokością. Można też zauważyć znaczny wzrost zmienności analizowanych wartości w części przyległej do dna zbiornika oraz pierścienia wiatrowego. W miejscach tych wpływ imperfekcji na stan zaburzeń brzegowych jest spowodowany dodatkową sztywnością wspomnianych elementów. Pomijając te fragmenty zaburzeń można podać, że w zakresie zachowania się płaszcza jako konstrukcji powłokowej zmienności poszczególnych analizowanych wielkości naprężeń kształtują się w granicach podanych w tablicy 2. Szczególnie duże procentowe wartości niektórych prezentowanych wielkości są wynikiem znikomej wartości wzorcowej (niejednokrotnie bliskiej zeru), służącej do standaryzacji analizowanej wielkości.

Tablica 1
Zakresy zmienności sił wewnętrznych

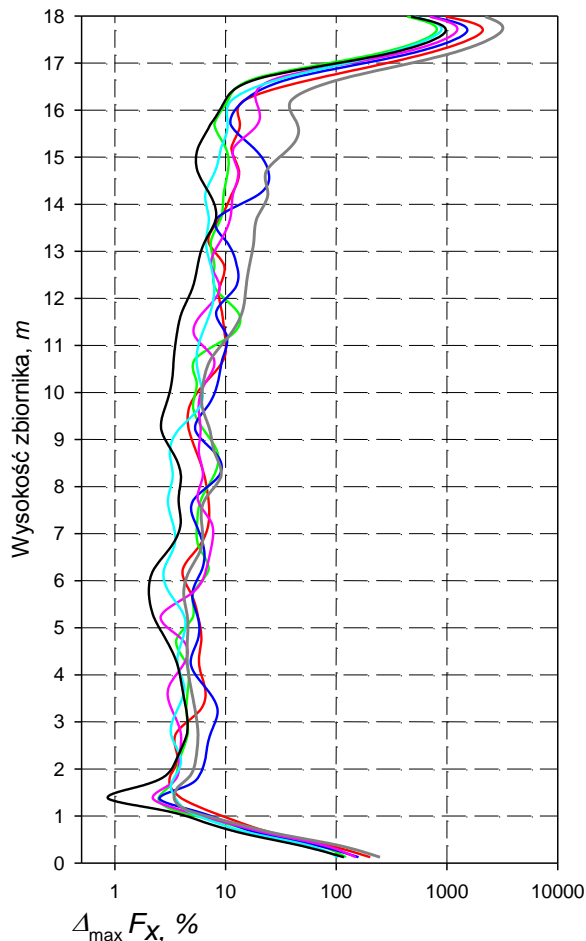
Wielkość statyczna	Procentowy zakres zmienności dotyczący zbiorników z grupy	
	„A”	„B+C”
F_x	3 ÷ 25	3 ÷ 30
F_y	-200 ÷ - 5000	-1500 ÷ -10000
M_y	-60 ÷ 100	-80 ÷ 800
Q_y	-70 ÷ 250	-80 ÷ 600

Tablica 2
Zakresy zmienności naprężeń

Naprężenie	Procentowy zakres zmienności dotyczący zbiorników z grupy	
	„A”	„B+C”
$\sigma_{x \text{ bot}}$	5 ÷ 40	2 ÷ 55
$\sigma_{x \text{ top}}$	5 ÷ 30	7 ÷ 45
$\sigma_{y \text{ bot}}$	10 ÷ 550	30 ÷ 350
$\sigma_{y \text{ top}}$	-50 ÷ 450	-30 ÷ 600
$\sigma_{HMH \text{ bot}}$	7 ÷ 25	7 ÷ 35
$\sigma_{HMH \text{ top}}$	4 ÷ 30	4 ÷ 45



Rys. 5. Zakresy zmienności siły obwodowej



Rys. 6. Procentowe zwiększenie wartości siły obwodowej

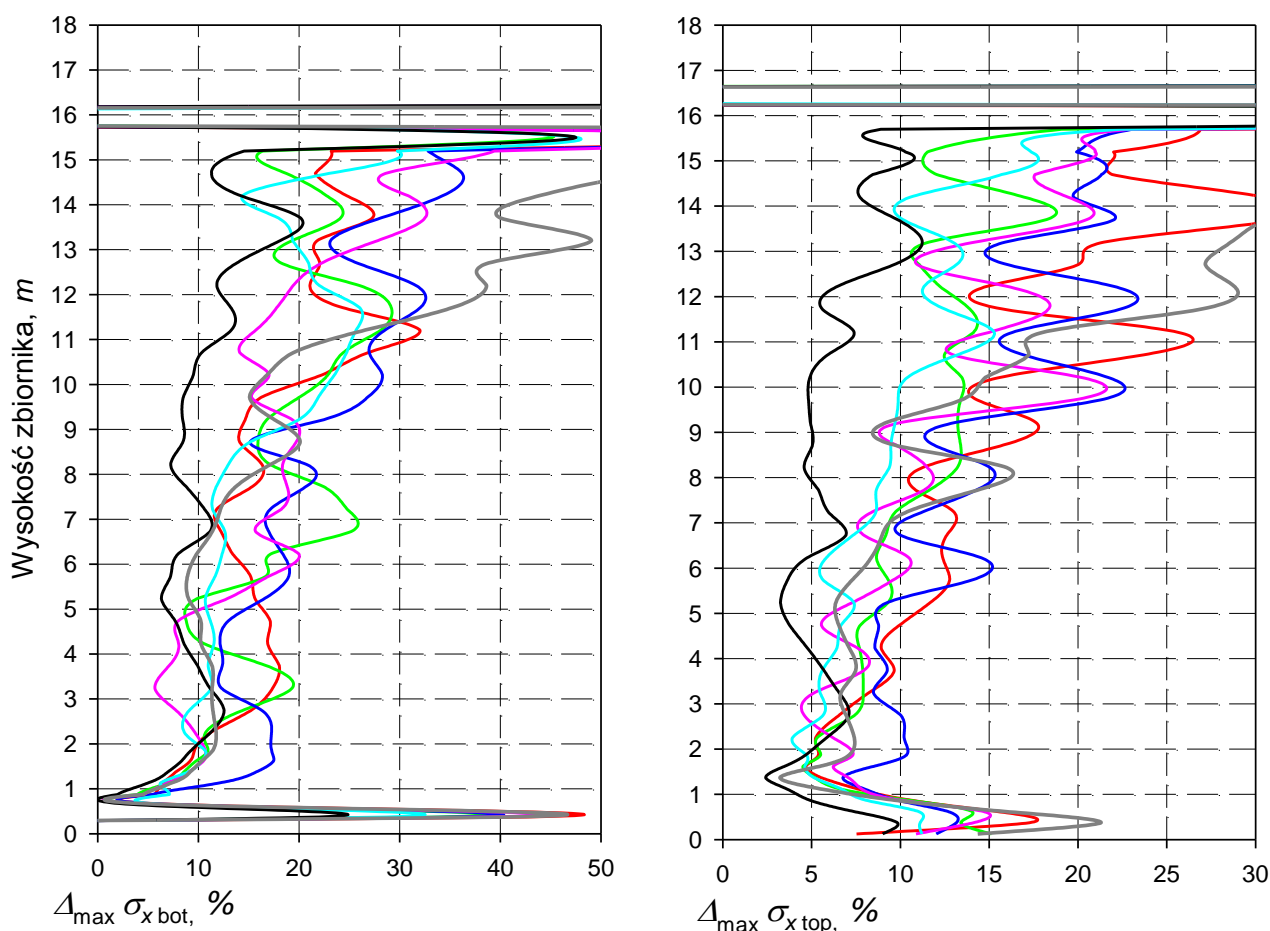
Ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji obiektu i rezerwy nośności konstrukcji ważna jest wielkość przyrostu wartości analizowanych sił wewnętrznych oraz naprężeń $\Delta_{\max} X$ ponad wartość sił i naprężeń określonych na podstawie norm projektowania (rys. 6, 7).

$$\Delta_{\max} X = [(X_{\max} - X_{\text{wzór}}) / X_{\text{wzór}}] \cdot 100\% \quad (2)$$

Przedstawione wykresy procentowego zwiększenia sił wewnętrznych oraz naprężeń ponad określone obliczeniowo z uwzględnieniem wartości charakterystycznego obciążenia można prześledzić na wartościach podanych w tabl. 3.

Tablica 3
Zakresy maksymalnego zwiększenia naprężeń

Naprężenie	Procentowy zakres zmienności dotyczący zbiorników z grupy	
	„A”	„B+C”
$\sigma_{x \text{ bot}}$	2 ÷ 25	0 ÷ 30
$\sigma_{x \text{ top}}$	3 ÷ 12	3 ÷ 22
$\sigma_{\text{HMH bot}}$	4 ÷ 15	5 ÷ 20
$\sigma_{\text{HMH top}}$	2 ÷ 15	5 ÷ 25



Rys. 7. Procentowe zwiększenie wartości naprężeń

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

W celu praktycznej weryfikacji wykonanej analizy numerycznej wykonano polowe badania tensometryczne zbiornika pojemności $V=12000 \text{ m}^3$. Zbiornik ten charakteryzował się znacznymi imperfekcjami kształtu płaszcza. Badania potwierdziły zróżnicowanie naprężeń w powłoce płaszcza, dotyczących poszczególnych poziomów pomiarowych, a także prawidłowość przeprowadzenia analiz numerycznych [10].

Podsumowanie

Wykonane analizy numeryczne potwierdziły, że zwiększenie wartości imperfekcji geometrycznych powłoki oraz ich wzajemne zróżnicowanie powoduje rozrzut wartości sił i naprężeń w obrębie tych samych porównywanych poziomów wysokości zbiornika. Obwodnie wartości naprężeń obwodowych i zredukowanych w analizowanych zbiornikach o pojemności $50\,000 \text{ m}^3$ pozwalają stwierdzić, że nie występują przypadki przekroczenia stanu wytrzymałości obliczeniowych odpowiednich gatunków stali. Bezpieczeństwo eksploatacji obiektów jest więc zachowane.

Wartości dopuszczalnych odchyłek odbiorowych, dotyczących geometrii płaszcza zbiornika określone w polskich przepisach normowych [2] nie budzą zastrzeżeń.

Również wartości dopuszczalnych imperfekcji geometrycznych podane w przepisach normowych [2, 6, 7, 8] są określone prawidłowo. Należy jednak wspomnieć, że projekt Eurokodu [9] dotyczącego powłok stalowych podaje w formie bardzo uproszczonej sposób określenia jakości wykonania powłoki pod względem prawidłowości kształtu. Kryteria w niej podane są dużo mniej wymagające. Wszystkie analizowane zbiorniki, wg wspomnianej normy [9], spełniają warunki wykonania konstrukcji w zakresie klasy A.

Analiza wytrzymałościowa konstrukcji zbiornikowych z imperfekcjami kształtu powinna uwzględniać ewentualne niskocyklowe zmęczenie materiału oraz wady materiałowe, jak i wykonania mające wpływ na lokalne zmiany stanu naprężenia i bezpieczeństwa konstrukcji.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Biuro Projektów CPN „Naftoprojekt”: Dokumentacje projektowe zbiorników z dachami pływającymi o pojemności $V=50\ 000\ m^3$.
- [2] PN-B-03210:1997 Konstrukcje stalowe - Zbiorniki walcowe pionowe na cieczy - Projektowanie i wykonanie.
- [3] Kowalski D.: „Naprężenia w płaszczu zbiornika stalowego z lokalnymi deformacjami”, Inżynieria i Budownictwo, vol. 57, nr 6, 2001, s. 351-353.
- [4] Kowalski D.: „Dokładność wykonawstwa konstrukcji zbiornikowych w ujęciu statystycznym i wytrzymałościowym”, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 585, 2001, s. 149–156.
- [5] Kowalski D.: „Jakościowa i ilościowa ocena odchyłek wykonania płaszczy zbiorników stalowych”. Problemy eksploatacyjne baz magazynowych produktów naftowych, Poznań, 11-12 maja 1999, pp. 1-10.
- [6] API Standard 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute.
- [7] BS 2654 :1984 British Standard Specification for Manufacture of vertical steel welded storage tank with butt welded shells for the petroleum industry.
- [8] 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.
- [9] EN 1993-1-6:2004 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.6: General Rules: Strength and Stability of Shell Structures.
- [10] Kowalski D.: Badania tensometryczne płaszcza zbiornika z imperfekcjami kształtu. Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2004, pp. 393–400.