

DARIUSZ KOWALSKI

Katedra Konstrukcji Metalowych

DOKŁADNOŚĆ WYKONAWSTWA KONSTRUKCJI ZBIORNIKOWYCH W UJĘCIU STATYSTYCZNYM I WYTRZYMAŁOŚCIOWYM

Przedstawiono wyniki analizy statystycznej i wytrzymałościowej konstrukcji zbiornikowych o dużych pojemnościach ze wstępnymi imperfekcjami.

1. WSTĘP

Projektując konstrukcje budowlane projektant, w sposób deterministyczny przyjmuje, że będzie się ona składała z elementów o idealnych kształtach zarówno przekroju poprzecznego, jak i osi, że elementy te zostaną wykonane z materiałów o jednorodnych właściwościach mechanicznych oraz że będą to elementy pozbawione naprężeń własnych (rezydualnych). Takie same postulaty dotyczące idealności wysuwane są w stosunku do wykonawstwa warsztatowego elementów składowych konstrukcji, montażu oraz późniejszej eksploatacji. Stosowana w Polsce, jak i w wielu innych krajach, metoda wymiarowania konstrukcji oparta na określaniu stanów granicznych zobowiązuje projektanta do określenia nośności konstrukcji idealnych. Wszelkie niedoskonałości materiału oraz zmienności obciążenia ujmowane są w postaci odpowiednio: współczynników materiałowych oraz współczynników obciążenia uwzględniających możliwości wystąpienia wartości obciążenia nie korzystniejszej od wartości charakterystycznej. Elementy konstrukcji obiektu obarczone są niedoskonałościami lub wadami początkowymi, które nazywamy imperfekcjami. Występujące w elementach imperfekcje można podzielić na : strukturalne, technologiczne oraz geometryczne.

Niedoskonałości elementów powstają na każdym etapie wytwarzania, zarówno w procesie kształtowania – produkcji wyrobów hutniczych, procesie obróbki, transportu, scalania oraz montażu wykonywanego na placu budowy. Wstępnymi imperfekcjami obarczony jest zatem pojedynczy element składowy – arkusz blachy, jak i cała konstrukcja – płaszcz zbiornika. Charakter poszczególnych niedokładności jest losowy, ale dla celów kontroli wykonania obiektu zastał ujęty w pewne ramy tzw. dopuszczalnych odchyłek zarówno materiałowych oraz geometrycznych elementów składowych konstrukcji oraz całego obiektu. Wielkości dopuszczalnych imperfekcji zostały określone w normach wykonawczych oraz odbiorowych dotyczących poszczególnych rodzajów konstrukcji. Wartości dopuszczalne wstępnych wad mogą być akceptowane pod warunkiem, że nie zmniejszają

w sposób znaczący nośności i bezpieczeństwa ustroju. W normowych modelach obliczeniowych dotyczących projektowania konstrukcji stalowych losowe cechy geometryczne przekroju poprzecznego elementów uwzględnia się łącznie z parametrami losowymi wytrzymałości materiału. Inne niedoskonałości wstępne o charakterze geometrycznym, technologicznym, konstrukcyjnym oraz montażowym uwzględnia się za pomocą odpowiedniego wyspecyfikowania współczynników niestateczności lub analizy statyczno-wytrzymałościowej ustroju z uwzględnieniem imperfekcji.

Występowanie losowych imperfekcji geometrycznych sprawia, że nośności takich ustrojów są mniejsze niż ich oszacowania wykonane dla modelu idealnej konstrukcji bez wad. W zasadniczej mierze imperfekcje geometryczne są szczególnie istotne dla ściskanych elementów konstrukcji, które pod wpływem obciążenia ulegają wyboczeniu (powłoki walcowe pod obciążeniem osiowym). W elementach rozciąganych wpływ ten jest zdecydowanie mniejszy i nieuwzględniany w metodach obliczeniowych. Nie znaczy to jednak, że nie ma to żadnego wpływu na stany naprężeń występujące w przekrojach elementów składowych, jak i całej konstrukcji obiektu, jakim jest zbiornik.

2. OGRANICZENIA NORMOWE

Od roku 1997 obowiązuje w Polsce norma PN-B-03210:1997 „Konstrukcje stalowe. Zbiorniki walcowe pionowe na cieczę. Projektowanie i wykonanie.” Określa ona zasady obliczania, projektowania oraz wymagania dotyczące produkcji, montażu i odbioru zbiorników. W normie tej zawarto wartości dopuszczalnych odchyłek dotyczących zarówno poszczególnych elementów konstrukcji zbiornika, jak i całej konstrukcji z podziałem na dno, płaszcz oraz dach zbiornika.

Poniżej przedstawiono wartości odchyłek geometrycznych wg normy [1] dla zbiornika o pojemności $V = 50\ 000\ m^3$ (średnica $d = 64,82\ m$; wysokość $h = 18,10\ m$) (tabl. 1).

1) Dopuszczalne odchyłki wykonawcze płaszcza

Tablica 1

Dopuszczalne odchyłki wykonawcze wg PN-B-03210:1997

Lp.	Rodzaj odchyłki	Warunek	Wartość dla zbiornika $V=50\ 000\ m^3$
1	Odchyłka średnicy wewnętrznej płaszcza w odległości 300 mm od dna zbiornika	$\pm 60\ mm$	$\pm 60\ mm$
2	Odchyłka średnicy wewnętrznej płaszcza na poziomie górnej krawędzi ostatniego pasa	$\pm 0,0020d$	$\pm 130\ mm$
3	Różnica średnic dwóch sąsiednich pasów w tej samej płaszczyźnie pomiarowej	$0,0010d$	$\pm 65\ mm$
4	Różnica średnic płaszcza zbiornika na tej samej wysokości (w tej samej płaszczyźnie poziomej)	$0,0010d$	$\pm 65\ mm$
5	Odchyłka wysokości płaszcza zbiornika	$\pm 0,0020h$	$\pm 36\ mm$
6	Strzałka odchylenia tworzącej płaszcza od pionu	$\pm 0,0045h$	$\pm 81\ mm$
7	Lokalne odkształcenie (wypukłości i wklęsnięcia na powierzchni w obrębie jednego pasa)	mierzone szablonem kołowym o długości 2 m	20 mm
		mierzone pionowym szablonem o długości 2 m	20 mm
8	Różnica obwodu płaszcza w dwóch sąsiednich pasach mierzona w środku pasa	$0,0010$ obwodu	200 mm

- 2) Dopuszczalne odchyłki elementów konstrukcji wchodzących w skład płaszcza zbiornika:
- długość - + 3,0 mm
 - szerokość - $\pm 1,5$ mm
 - różnica długości przekątnych 3,0 mm
 - dokładność walcowania elementów mierzona bezpośrednio na stanowisku walcowania szablonem o długości 2,0 m (dopuszczalne odchylenie od zarysu szablonu):- 4,0 mm – na końcu blachy, - 3,0 mm – na pozostałej części.

3. RZECZYWISTE DEFORMACJE WSTĘPNE PŁASZCZY ZBIORNIKÓW

Dysponując pomiarami geodezyjnymi deformacji płaszczy zbiorników, dokonano próby statystycznej oceny wartości wstępnych i późniejszych imperfekcji geometrycznych. Opracowania dokonano na próbce dwunastu zbiorników walcowych o osi pionowej, o pojemności $V = 50\ 000\ m^3$, które zostały wybudowane w ostatnim dziesięcioleciu w bazach magazynowych. Pomiary deformacji płaszczy zbiorników zostały wykonane przy co najmniej trzech stanach eksploatacji zbiornika:

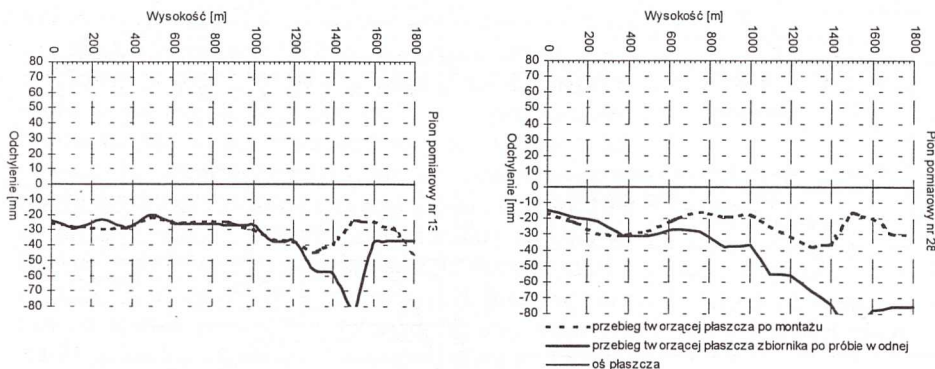
- a) zbiornik pusty – bezpośrednio po zakończeniu montażu,
- b) zbiornik pełny – pomiar wykonany w czasie próby wodnej,
- c) zbiornik pusty – po zakończeniu próby wodnej

Do dalszej analizy posłużono się wartościami imperfekcji ze stanu a) oraz c).

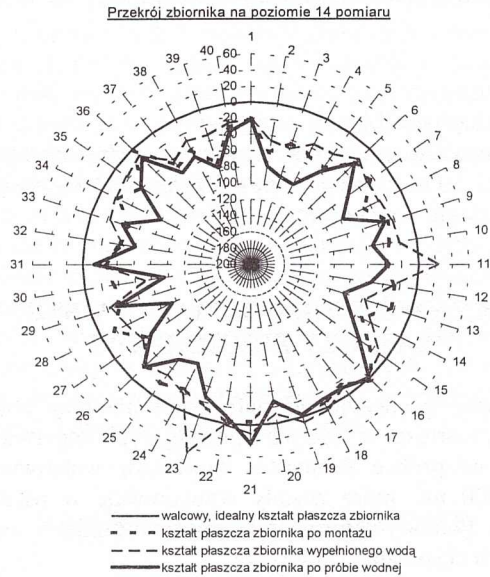
Pomiary odchylenia płaszczy zostały wykonane na następujących poziomach:

- u postawy każdego pierścienia blach (carg) stanowiących płaszczy zbiornika,
- w połowie wysokości każdego pierścienia blach
- na końcu wysokości płaszcza zbiornika.

Poniżej, na wybranych pionach pomiarowych przedstawiono przykładowe odchyłki tworzącej płaszcza od teoretycznego kształtu.

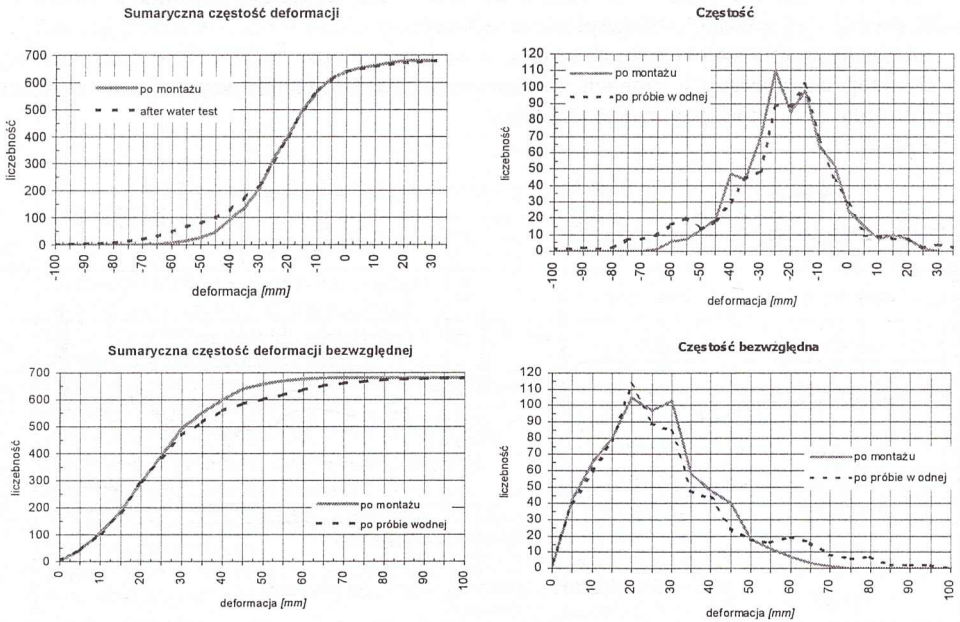


Rys. 1. Przykładowy przebieg tworzącej płaszcza



Rys. 2. Przykładowy przekrój poziomy płaszczu zbiornika

Poniżej przedstawiono przykładowe rozkłady deformacji występujące w płaszczu jednego z analizowanych zbiorników.

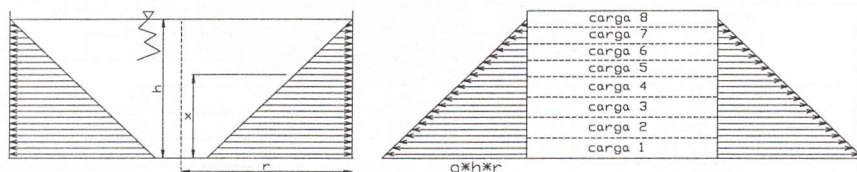


Rys. 3. Rozkłady statystyczne deformacji płaszczu zbiornika

4. ANALIZA WARTOŚCI SIŁ WEWNĘTRZNYCH ZDEFORMOWANYCH PŁASZCZY ZBIORNIKÓW

Występujące odchyłki geometryczne powstałe w etapie wykonania i montażu konstrukcji płaszcza zbiornika powodują nie tylko zmniejszenie nośności elementów, ale wywołują niezamierzoną, losową zmianę wartości sił wewnętrznych.

Konsekwencją stwierdzonych w praktyce odchyłek jest lokalna zmiana wartości teoretycznie wyznaczonych sił wewnętrznych w płaszczu zbiornika. Zbiornik walcowy jest obiektem inżynierskim, w którym parcie poziome cieczy w nim magazynowanej wywołuje siły obwodowe rozciągania płaszcza zbiornika.



Rys. 4. Schemat obliczeniowy zbiornika

W najprostszy sposób ujmując siła wewnętrzna na dowolnym poziomie płaszcza, na całym obwodzie zbiornika, powinna ona mieć jednakową wartość. Wartość ta określona jest teoretycznie wzorem (4.1), w którym pominięto współczynniki bezpieczeństwa stosowane w metodzie stanów granicznych [2]:

$$N_{xx} = \gamma \cdot (h - x) \cdot r \quad (4.1)$$

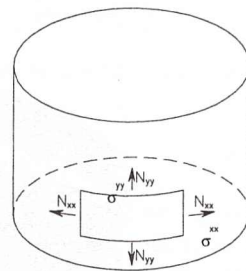
gdzie: γ – ciężar objętościowy cieczy [kN/m³]

h – maksymalna poziom magazynowanej cieczy [m],

x – współrzędna wysokości [m],

r – promień wewnętrzny zbiornika [m].

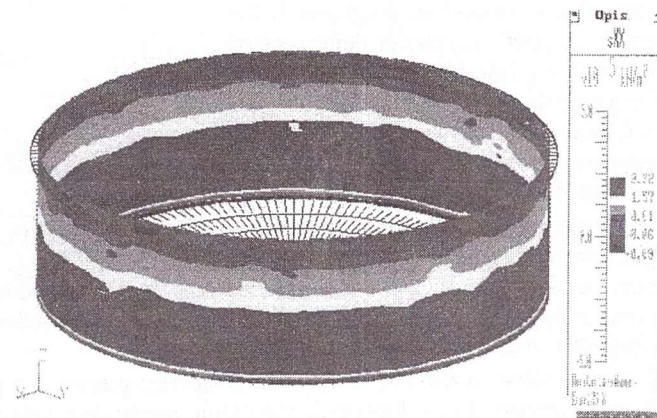
Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki analiz numerycznej wykonanej przy zastosowaniu programu Robot V6, obiektów zbiornikowych ze wstępnymi deformacjami powstałymi w okresie budowy zbiornika (tabl. 2). Przedstawione wyniki odnoszące się do dwóch wybranych pierścieni tworzących płaszcza zbiornika-pierścienie nr 1 i 3, dla dwóch dowolnie na nich wybranych poziomach obliczeniowych. W tablicy zamieszczono dodatkowo siły N_{yy} oraz odpowiadające im naprężenia σ_{yy} . Wstępne wyniki analizy wpływu lokalnych imperfekcji płaszcza zbiornika na wartości sił wewnętrznych wykazały, że w istotny sposób zmieniają one stan naprężenia wyznaczony teoretycznie przy założeniu idealnego kształtu zbiornika. Analizując tablicę nr 2, i wartości sił N_{yy} i naprężeń σ_{yy} , należy wziąć pod uwagę fakt połączenia pierwszego pierścienia ze stalowym pierścieniem obrzeżnym dna, w którym to połączeniu mamy do czynienia z zaburzeniem brzegowym Na rys. 6-8 przedstawiono mapy naprężeń występujących w płaszczu zbiornika w którym pomierzono rzeczywiste imperfekcje wykonawcze.



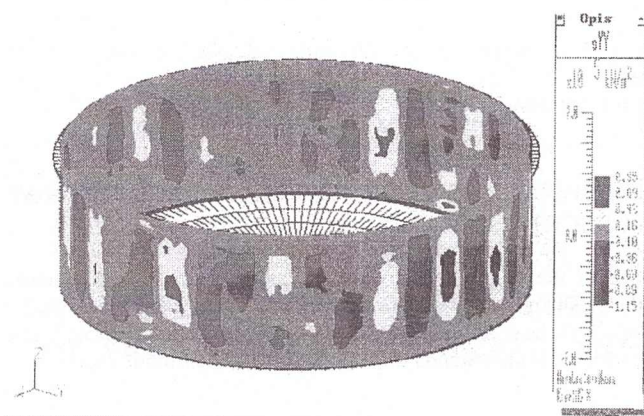
Rys. 5. Ukierunkowanie sił wewnętrznych

Porównanie sił i naprężeń w zbiorniku idealnym i ze wstępными imperfekcjami

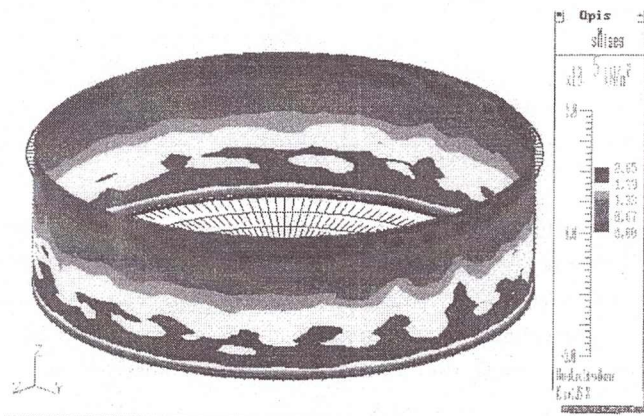
		N_{xx}	N_{yy}	N_{zast}	σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{zast}
		kN/m	kN/m	kN/m	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²
Pierścień nr 1	idealny						
		733,45	0,00	733,45	-4,53	-116,98	114,78
	zdeformowany						
	<i>min</i>	394,66	-24,54	507,71	-21,98	-132,29	116,67
	<i>max</i>	999,58	30,66	1000,78	3,97	-118,95	127,07
	<i>średnia</i>	708,14	0,97	744,13	-8,43	-126,27	122,57
	idealny						
		5072,82	-0,05	5072,85	219,77	28,00	207,19
	zdeformowany						
	<i>min</i>	4898,06	-44,56	4919,85	210,75	25,63	199,23
<i>max</i>	5160,84	50,02	5151,84	227,53	33,49	212,82	
<i>średnia</i>	5054,69	2,44	5062,43	219,28	28,94	206,54	
Pierścień nr 3	idealny						
		3534	0	3534	197,60	4,20	195,53
	Zdeformowany						
	<i>min</i>	3389,87	-125,50	3445,34	185,30	-6,27	185,46
	<i>max</i>	3644,24	105,95	3610,00	208,80	14,43	202,63
	<i>średnia</i>	3528,94	2,66	3533,34	197,43	4,66	195,37
	idealny						
		3196,96	-0,14	3197,03	176,41	-3,98	178,44
	zdeformowany						
	<i>min</i>	3025,67	-195,76	3117,51	149,53	-15,82	160,90
<i>max</i>	3311,29	124,65	3275,61	192,30	7,40	188,81	
<i>średnia</i>	3190,10	4,35	3194,80	175,86	-4,31	178,43	



Rys. 6. Mapa naprężeń obwodowych w zbiorniku z deformacjami



Rys. 7. Mapa naprężeń pionowych w zbiorniku z deformacjami



Rys. 8. Mapa naprężeń zredukowanych w zbiorniku z deformacjami

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników obliczeń wytrzymałościowych dla jednego zbiornika, można stwierdzić, że niekiedy stosunkowo niewielkie odchylenia od kształtu idealnego mogą być przyczyną powstania wzrostu wartości sił wewnętrznych w zakresie od 2 – 35%, w stosunku do wartości otrzymanych z obliczeń teoretycznych. Aby zapewnić bezpieczeństwo eksploatacji konstrukcji już na etapie projektowania, należy przyjąć odpowiednie współczynniki obciążenia podane w normach, a zgodne z metodą wymiarowania wg stanów granicznych oraz określić metodę wykonania konstrukcji zapewniającą odpowiednią jakość obiektu. Opracowania projektowe powinny określać wielkości dopuszczalnych deformacji dla danej konstrukcji lub też powoływać się na odpowiednie przepisy normatywne.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-B/03210:1997 Konstrukcje stalowe. Zbiorniki walcowe pionowe na ciecz. Projektowanie i wykonywanie.
- [2] Ziółko J.: Zbiorniki metalowe na ciecz i gazy. Warszawa: Arkady 1986.

ACCURACY OF THE TANK STRUCTURES PERFORMANCE IN STATISTICAL DESCRIPTION AND IN STRENGTH ANALYSIS

The paper concerns the strength behaviour of large capacity steel cylindrical tanks made in recent years in Poland. The measurements of geometrical imperfections tank shells are the basis for the statistical description of these imperfections and for the analysis of strength effects. The results have been compared with the Polish Standard PN-B-03210:1997 currently in use.