

prof. dr hab. inż. Marian Gwóźdź^{1)*}
dr inż. Maciej Suchodoła¹⁾

Analiza nośności przekrojów aluminiowego zbiornika na styren

Analysis of cross section load bearing capacity of aluminium tank for styrene

DOI: 10.15199/33.2015.09.38

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. Przeprowadzono analizę nośności ocieplonego, naziemnego aluminiowego (stopy AW-5754) zbiornika walcowego o osi pionowej, z dachem stożkowym stałym. Ma on pojemność 500 m³ i jest przeznaczony do magazynowania styrenu. Konstrukcja zbiornika należy do klasy konsekwencji zniszczenia CC2 i kategorii projektowego okresu użytkowania 4. Uwzględniono klasę konsekwencji zniszczenia zbiornika CC2, dla której przeprowadzono odpowiednie obliczenia numeryczne, uwzględniając alternatywne metody analizy konstrukcji:

- uproszczone reguły obliczania wg teorii błonowej do wyznaczenia naprężeń podstawowych oraz wzory zgięciowej teorii powłok sprężystych do opisu lokalnych efektów zginania;
- analizę numeryczną metodą elementów skończonych.

Rezultaty obliczeń komputerowych umożliwiły ocenę błędów modelowania zbiorników aluminiowych zgodnie z aktualnymi normami projektowania konstrukcji powłokowych.

Słowa kluczowe: zbiornik, aluminium, nośność, współczynnik nośności, niezawodność.

Abstract. Analysis of load bearing capacity of above ground, vertically axis, insulated cylindrical aluminum tanks with conical roof have been carried out. The tank with a capacity of 500 m³, made of alloy AW-5754, is been intended for storing of styrene. The structure belongs to the CC2 consequence class and 4 category of design working lives. Calculation have been conducted for CC2 consequence class, taking into consideration alternative methods:

- simplified rules for the calculation according to the membrane theory to determine the principal stress; and flexural basic theory of elastic shells to describe local bending effects;
- numerical analysis using a finite element method.

Computing results made it possible to make an assessment modeling errors aluminum tanks according to current design standards shell structures.

Keywords: tank, aluminium, capacity, capacity coefficient, reliability.

W projektowaniu konstrukcji aluminiowych zmianę jakościową przyniosły rekomendacje europejskie, a w szczególności: Eurokod i Eurokod 9 [1, 2], które preferują ocenę niezawodności wg metody współczynników obciążenia i nośności oraz perfekcyjne modelowanie komputerowe konstrukcji metalowych z uwzględnieniem imperfekcji wieloźródłowych. Współczynniki nośności, oznaczane w eurokodach symbolem γ_M są odniesione do wartości charakterystycznych R_k i mają one strukturę multiplikatywną:

$$\gamma_M = (R_k/R_d) \cdot \gamma_{Rd} = \gamma_m \gamma_{Rd} \quad (1)$$

gdzie:

γ_m – współczynnik uwzględniający niekorzystne odchyłki właściwości mechanicznych od wartości charakterystycznej, który można zweryfikować w badaniach statystycznych wytrzymałości stopów aluminiowych;

γ_{Rd} – współczynnik uwzględniający niepewność modelu nośności, który można wyspecyfikować w analizie statycznej ustroju analizowanego wg różnych założeń modelowych.

W pierwszej edycji Eurokodu 9 [2] współczynniki nośności γ_M nie zostały wyspecyfikowane w badaniach statystycznych, lecz przyjęto je arbitralnie, a w szczególności dla umownej granicy plastyczności stopów aluminium przyjęto: $\gamma_{R02} = \gamma_{M1} = 1,1$, a w przypadku wytrzymałości na rozzerwanie: $\gamma_{Rm} = \gamma_{M2} = 1,25$.

W artykule podjęto tematykę oceny niezawodności konstrukcji aluminiowych wg metody współczynników obciążenia i nośności przyjętej w normalizacji europejskiej CEN. Zakres badań i analiz został ograniczony do specyfikacji współczynników nośności przekrojów aluminiowych γ_{m1} i γ_{m2} wykonanych z wyrobów hut-

niczych, wyprodukowanych w Polsce w latach 1976 – 1980. Ocenę błędów modelowania γ_{Rd} pokazano na przykładzie zbiornika aluminiowego na styren.

Badania statystyczne wytrzymałości krajowych wyrobów aluminiowych

Próbę statystyczną wytrzymałości stopu AlCu4Mg2 o liczebności $n = 1295$ realizacji zestawiono w latach 1986 – 1988 w pracy [3]. Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej cech mechanicznych w układzie trzyletnim przedstawiono w tabeli. W kolumnach (4) i (7) zestawiono wartości średnie: granicy plastyczności R_e , wytrzymałości na rozciąganie R_m , a w kolumnach (5) i (8) zestawiono wartości odpowiednich współczynników zmienności. Obliczone parametry poszczególnych cech mechanicznych umożliwiły sta-

Parametry rozkładu umownej granicy plastyczności R_{02} i wytrzymałości doraźnej R_m stopu AlCu4Mg2 wg badań własnych [3]

Parameter of yield strength R_{02} and ultimate strength R_m distribution of AlCu4Mg2 alloy on the basis of internal research [3]

Grupa asortymentowa	Grubość t [mm]	Liczebność n	Granica plastyczności umownej R_{02} [MPa]			Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]		
			\check{R}_{02}	v_{R02}	γ_{m0}	\check{R}_m	v_{Rm}	γ_{m2}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Blachy	2 ÷ 10	272	308	0,059	1,088	441	0,022	1,000
	12 ÷ 25	122	335	0,042	1,000	444	0,033	1,003
	26 ÷ 40	102	335	0,037	1,000	425	0,048	1,089
	41 ÷ 70	132	328	0,044	1,000	400	0,047	1,153
	2 ÷ 80	628	322	0,062	1,050	428	0,056	1,108
Kształtowniki	2 ÷ 20	272	378	0,093	1,053	500	0,083	1,081

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

* Autor do korespondencji; e-mail: margwozd@interia.pl

tystyczne oszacowanie wartości współczynników częściowych γ_{m0} i γ_{m2} , zestawionych w kolumnach (6) i (9):

$$\gamma_m = R_{\min} / [R_{\text{exp}}(-3,04v_R)] \quad (2)$$

gdzie:

R_{\min} – minimalne hutnicze R_{02} lub R_m , gwarantowane przez krajowe hutnictwo w okresie produkcji badanych wyrobów hutniczych;

v_R – współczynnik zmienności minimów jw.

Z wartości $\gamma_{m0} \geq 1,0$ zestawionych w kolumnie (6) i wartości $\gamma_{m2} \geq 1,0$ zestawionych w kolumnie (9) wynika, że specyfikacja normowa: $\gamma_{m0} = 1,1$ oraz $\gamma_{m2} = 1,25$; zamieszczona w PN-EN 1999-1-1 [2], w ogólnym przypadku jest uzasadniona statystycznie w przypadku wytrzymałości badanych wyrobów hutniczych z lat osiemdziesiątych oraz szeroko rozumianej próby reprezentatywnej jako atestów pochodzących z różnych wytopów i różnych wyrobów hutniczych.

Ocena błędów modelowania

Błędy modelowania konstrukcji aluminiowych są wielozródłowe i wynikają z nieadekwatności modelu obliczeniowego i zrealizowanego projektu. Jeśli sformułujemy kryterium stanu granicznego nośności w postaci bezwymiarowego wskaźnika wykorzystania nośności $\eta_i \leq 1$ dla $i = 1, 2, \dots, n$ -tej metody analizy statycznej, to miarą błędów obliczeń jest iloraz:

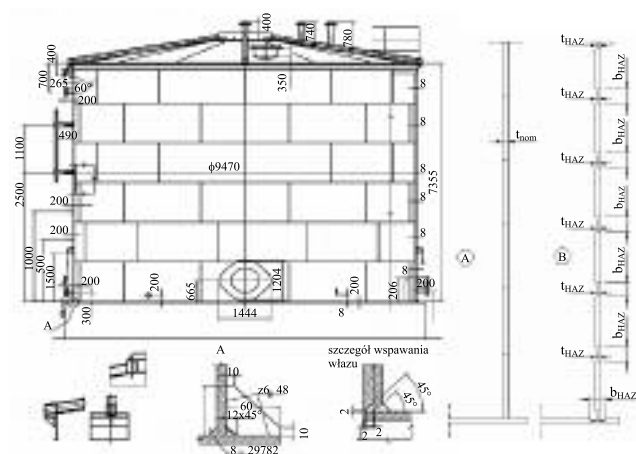
$$\gamma_{Rd} = \eta_i / \eta_{\text{inf}} \quad (3)$$

gdzie:

η_{inf} – wskaźnik wykorzystania nośności wg najbardziej zaawansowanej metody obliczeń statycznych.

W artykule przedstawiono przykład obliczeń w stanie granicznym nośności plastycznej (LS1), opracowany dla istniejącego aluminiowego zbiornika na styren (rysunek 1). Konstrukcję nośną zbiornika o pojemności 500 m³ stanowi walcowa powłoka z blach aluminiowych grubości $t = 8$ mm. Powłokę dachu oparto na dźwigarach spawanych o przekroju dwuteowym (średnik $t = 8$ mm oraz pasy $t = 16$ mm). Zastosowano stop AW 5454, którego umowna granica plastyczności wynosi $f_o = 160$ MPa, współczynnik redukcyjny w strefach wpływu ciepła przy spawaniu $\rho_{o,HAZ} = 0,50$ oraz współczynnik konwersji wytrzymałości spowodowany temperaturą technologiczną styrenu $k_{ob} = 0,96$.

Analizę nośności zbiornika przeprowadzono dla kombinacji obciążeń, wg której zbiornik wypełniony jest styrenem o gęstości masy 8,93 kN/m³ przy równoczesnym działaniu naciśnienia 2,5 kPa i temperatury obliczeniowej styrenu 50 °C. Przyjęto współczyn-



Rys. 1. Konstrukcja zbiornika oraz schemat pobocznicy o grubości: stałej A i zmiennej B

Fig. 1. Tank structure and shell model for: constant A, variable B thickness

niki obciążenia: dla parcia styrenu $\gamma_Q = 1,30$; dla naciśnienia $\gamma_Q = 1,50$. Ponadto uwzględniono współczynnik nośności plastycznej $\gamma_M = 1,1$. Obliczenia statyczne w stanie granicznym nośności plastycznej (LS1) przeprowadzono z wykorzystaniem modelowania numerycznego MES:

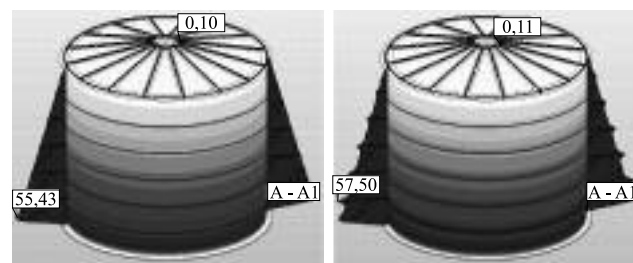
- powłoki walcowej poboczniczy i stożkowej dachu o stałej grubości blach (t) – rysunek 1;

- powłoki walcowej poboczniczy i stożkowej dachu o skokowo zmiennej grubości blach w strefach wpływu ciepła HAZ (t oraz $t_{p,HAZ}$).

Rezultaty modelowania MES przedstawiono na rysunku 2, na którym pokazano mapy naprężeń zastępczych poboczniczy zbiornika w przypadku dwóch schematów powłoki poboczniczy. Naprężenia zastępcze i wskaźnik wykorzystania nośności powłoki (a):

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} = 55,43 \text{ MN/m}^2 < k_{o,0} (f_o / \gamma_{M1}) \cdot \rho_{o,HAZ} = 70 \text{ MPa},$$

$$\eta_1 = 55,43 / 70,0 = 0,793$$



Rys. 2. Mapa naprężeń zastępczych $\sigma_{\text{eq,Ed}}$ poboczniczy zbiornika: a) – o wymiarach nominalnych; b) – o wymiarach zredukowanych Fig. 2. Equivalent stresses $\sigma_{\text{eq,Ed}}$ for tank shell with: a) normal thickness; b) reduced thickness

Naprężenia zastępcze i wskaźnik wykorzystania nośności powłoki (b):

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} = 57,50 \text{ MN/m}^2 < 70 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 57,50 / 70,00 = 0,821$$

Naprężenia zastępcze i wskaźnik wykorzystania nośności w stanie błonowym:

$$\sigma_{0,Ed} = [1,30 \cdot 8,93 \cdot (7,355 - 0,30) + 1,5 \cdot 2,5] \cdot 4,735 / 0,008 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 50,00 \text{ MN/m}^2 < 70 \text{ MPa},$$

$$\eta_3 = 50,00 / 70,0 = 0,714$$

Błąd modelowania w analizowanym przypadku zbiornika wg wzoru (3) wynosi:

$$\gamma_{Rd} = 0,821 / 0,793 \div 0,793 / 0,714 = 1,035 \div 1,111.$$

Uwzględniając wyniki badań statystycznych zamieszczone w tabeli, otrzymujemy oszacowanie współczynnika nośności plastycznej $\gamma_M = 1,05 \cdot (1,035 \div 1,111) = 1,09 \div 1,17$, z którego wynika, że modelowanie MES jest odpowiednią metodą obliczeń statycznych.

Podsumowanie

Weryfikacja współczynników nośności przekrojów aluminiowych γ_{M0} i γ_{M2} wykazała, że specyfikacje przyjęte w Eurokodzie 9 są statystycznie uzasadnione, w przypadku krajowych wyrobów aluminiowych z lat osiemdziesiątych i szeroko rozumianej definicji próby reprezentatywnej.

Literatura

- [1] PN-EN 1990. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji. PKN Warszawa 2004.
- [2] PN-EN 1999-1-1. Eurokod 9. Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1-1: Reguły ogólne. PKN Warszawa 2011.
- [3] Gwóźdź M., Machowski A.: Wybrane badania i obliczenia konstrukcji budowlanych metodami probabilistycznymi. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, (monografia 10 ark. wyd.), Kraków 2011.

Przyjęto do druku: 02.08.2015 r.