

dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWr*
 dr inż. Łukasz Skotny*
 inż. Joanna Boniecka*
 inż. Igor Druźbiak*

Uproszczone metody wymiarowania płaszczy silosów stalowych z uwagi na lokalną utrata stateczności

*Simplified methods of dimensioning steel silo shells
due to local stability failure*

Streszczenie. W normie EN 1993-4-1 opisano procedurę wymiarowania powłok stalowych płaszczy silosów z uwagi na lokalną utratę stateczności nad podporami odcinkowymi (głowicami słupów). W wielu wypadkach konieczna jest ocena nośności takiego płaszcza za pomocą bardzo zaawansowanej i pracochłonnej metody GMNIA. W praktyce inżynierskiej potrzebne jest często wstępne, a więc bezpieczne oszacowanie nośności stref podporowych płaszcza silosu. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń wartości południkowych obciążeń krytycznych płaszczy silosów na podstawie stosowanych do niedawna zaleceń literaturowych i normowych oraz porównano je z wynikami uzyskanymi za pomocą metody GMNIA.

Słowa kluczowe: nośność graniczna, stateczność powłok, analiza numeryczna.

Abstract. Code EN 1993-4-1 provide an design procedure of shell structures due to local stability failure in discrete supports region (i.e. over steel columns). In many cases complex and time consuming GMNIA method is required. In engineering work often only a simplified, safe side estimations are required for capacity of said regions due to local stability loss. In this paper calculations for critical meridional stresses are presented. Those stresses were obtained using the methods described in literature and norms, they are also compared to the results of GMNIA analysis.

Keywords: capacity estimation, shell stability, numerical analysis.

Wymiarowanie konstrukcji powłokowych, w tym walcowych powłok silosów stalowych, jest zagadnieniem złożonym. Szczególne trudności z właściwą oceną nośności ściskanych, walcowych powłok płaszczy silosów występują w przypadku ich podparcia na podporach odcinkowych, którymi często są głowice słupów. Silne spiętrzenie i duża nierównomierność południkowych naprężeń ściskających oraz imperfekcje wykonawcze w strefach podporowych płaszczy silosów sprawiają duże trudności w bezpiecznym oszacowaniu nośności tych powłok.

W świetle przepisów EN 1993-1-6 oraz EN 1993-4-1 wyróżnia się trzy możliwości wymiarowania z uwagi na utratę stateczności powłoki płaszcza silosu w zależności od klasy konsekwencji jego konstrukcji (CC1, CC2, CC3). Najtrudniejsza w wykonaniu, ale najdokładniejsza jest metoda analizy globalnej GMNIA. W mniej złożonych przypadkach można stosować uproszczoną metodę analizy globalnej LBA/MNA

lub metodę klasyczną, która polega na wyznaczaniu nośności krytycznej idealnej reprezentacji wymiarowanej powłoki i redukowaniu tej nośności z uwagi na możliwość wystąpienia imperfekcji i nierównomierności rozkładu naprężeń ściskających.

W artykule przedstawiono ogólnie dotychczas stosowane metody bezpiecznego szacowania nośności walcowej powłoki płaszcza silosu podpartego na słupach oraz wyniki uzyskane za pomocą tych metod. Wartości krytycznych reakcji południkowych głowicy słupa $R_{1,k}$ z tych przybliżonych metod porównano z wartością, uzyskaną na podstawie analizy GMNIA [1]. Analizowano płaszczy silosu stalowego na popiół denny o średnicy $D = 6$ m ($r = 3$ m), wysokości komory $l = 12$ m i nachyleniu leja (mierzonym od poziomu) 60° podpartego na sześciu równomiernie rozstawionych słupach [1]. Najniższa część płaszcza silosu (nad słupami) miała grubość $t = 10$ mm.

Obliczenia na podstawie PN/B-03202

Stosując normę PN/B-03202, nośność powłok stalowych z uwagi na niestateczność wyznaczano zgodnie z jej załącz-

nikiem A. Uzyskana wartość naprężeń krytycznych powłoki idealnej σ_{cr} dla analizowanego płaszcza silosu, z uwzględnieniem parametru $C_x \approx 1,0$, wyniosła:

$$\sigma_{cr} = 0,605 \cdot C_x \cdot \frac{E \cdot t}{r} = 413,5 \text{ MPa} \quad (1)$$

gdzie:

t – grubość powłoki;

r – promień powłoki;

E – moduł Younga materiału, z którego wykonano powłokę.

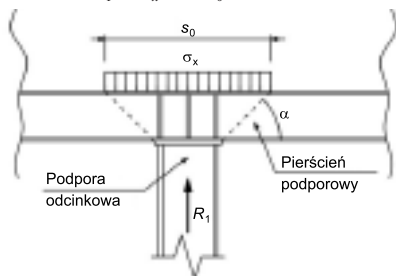
Wartość naprężeń krytycznych ze wzoru (1) służy do wyznaczenia smukłości względnej powłoki. W analizie uwzględniono, że klasa wykonania wynosi 2, a więc dla odpowiadających tej klasie imperfekcji i obliczonej smukłości względnej wyznaczono wartość współczynnika niestateczności miejscowej k_x , który w analizowanym przypadku dla ściskania południkowego wyniósł $k_x = 0,397$. W przypadku powłok w klasie 2 dokładności wykonania wyznaczono częściowy współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_2 = 1,2$. Tak więc graniczna wartość południkowych naprężeń ściskających, których przekroczenie może wywołać, wg PN/B-03202, utratę stateczności analizowanego płaszcza silosu, wynosi:

* Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

$$\sigma_x = f_{yk} \cdot \frac{k_x}{\gamma_2} = 77,7 \text{ MPa} \quad (2)$$

W normie PN/B-03202 nie uwzględniono rozróżnienia pomiędzy lokalną a globalną utratą stateczności. W analizowanym przypadku można przyjąć, że naprężenia w pierścieniu rozchodzą się pod kątem $\alpha = 45^\circ$ ($s_0 \approx 1,5 \text{ m}$ – rysunek 1) i że wyznaczone naprężenia graniczne (2) nie mogą być przekroczone w żadnym punkcie powłoki. Stąd maksymalna reakcja słupa R_1 wynosi:

$$R_1 = \sigma_x \cdot t \cdot s_0 = 1165 \text{ kN} \quad (3)$$

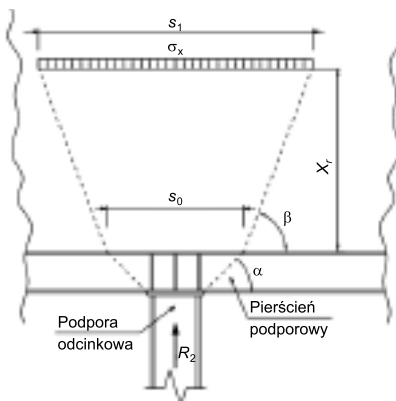


Rys. 1. Strefa przypodporowa silosu do wymiarowania wg PN/B-03202

W celach porównawczych wyznaczono charakterystyczną wartość $R_{1k} = 1165/1,2 = 970 \text{ kN}$, uwzględniając w tej metodzie średni współczynnik obciążenia silosu równy 1,2.

Analizy wg Samuelsona i Eggwertza [2]

W metodzie zaprezentowanej przez Samuelsona i Eggwertza [2], w analizie stateczności lokalnej płaszcz silosu podpartego na głowicach słupów nie uwzględnia się bardzo dużych wartości naprężeń brzegowych, lecz wyznacza nieco mniejsze naprężenia południkowe σ_x w odległości x_r od krawędzi powłoki płaszczu (rysunek 2). Jest to miejsce spodziewanego środka fali wybożeniowej. W analizowanym płaszczu silosu wysokość ta wyniosła:



Rys. 2. Strefa przypodporowa w wymiarowaniu zgodnie z metodą Samuelsona i Eggwertza [2]

$$x_r = 2 \cdot \sqrt{r \cdot t} = 346 \text{ mm} \quad (4)$$

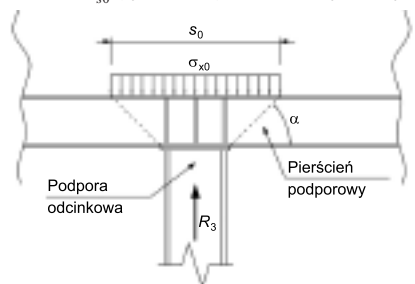
Zgodnie z założeniem [1], że naprężenia w powłoce walcowej rozchodzą się pod kątem $\beta = 70^\circ$ (rysunek 2), wyznaczono szerokość $s_1 = 1752 \text{ mm}$. Obliczeniowa reakcja graniczna wynosi zatem:

$$R_2 = \sigma_x \cdot t \cdot s_1 = 1361 \text{ kN} \quad (5)$$

a jej wartość charakterystyczna $R_{2k} = 1361/1,2 = 1134 \text{ kN}$.

Analizy wg metody Hotały [3]

Na podstawie wielu własnych badań eksperymentalnych, Hotała zaprezentował w pracy [3] metodę analizy stateczności lokalnej walcowych płaszczu silosów, wykorzystującą średnie naprężenia krawędziowe σ_{x0} (rysunek 3) i nową krzywą wy-



Rys. 3. Strefa przypodporowa w wymiarowaniu zgodnie z metodą Hotały [3]

boczeniową na bazie PN/B-03202, która uwzględnia lokalny charakter utraty stateczności powłok podpartych dyskretnie. Krzywa ta wyznaczana była przez zastąpienie we wzorze (1) współczynnika C_x współczynnikiem C_{x0} ze wzoru:

$$C_{x0} = 0,9 + 5 \cdot \frac{t}{r} \cdot \left(\frac{s_0}{2\pi r} \right)^{-1,2} = 1,247 \quad (6)$$

gdzie: s_0 to szerokość krawędzi powłoki (rysunek 3). Dalsza część procedury przebiega podobnie jak w PN/B-03202 i ostatecznie uzyskuje się naprężenia graniczne o wartości:

$$\sigma_{x0} = f_{yk} \cdot \frac{k_x}{\gamma_M} = 99,8 \text{ MPa} \quad (7)$$

Obliczeniowa reakcja krytyczna w analizowanym płaszczu silosu wynosi:

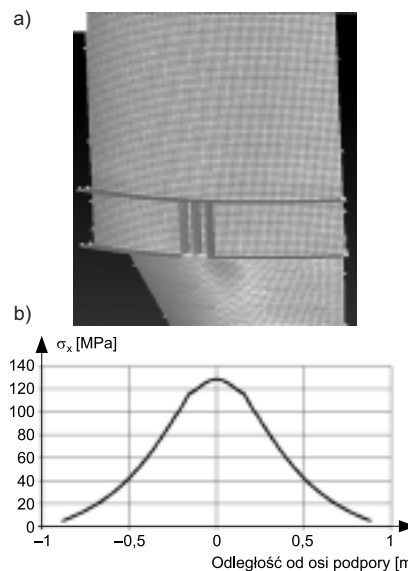
$$R_3 = \sigma_x \cdot t \cdot s_0 = 1497 \text{ kN} \quad (8)$$

a jej wartość charakterystyczna: $R_{3k} = 1497/1,2 = 1248 \text{ kN}$.

Obliczenia ręczne zgodnie z EN 1993-4-1

Specyfikę ręcznego wymiarowania silosów zgodnie z EN 1993-4-1 przedstawiono w [4]. W analizowanym przypadku rozkład naprężeń w zakresie sprężystym uzyskany z analiz numerycznych, opisanych w [1], przedstawiono na rysunku 4.

Wykorzystując algorytm normowy, wyznaczono stopień wykorzystania powłoki



Rys. 4. Rozkład południkowych naprężeń ściskających σ_x uzyskany w analizie liniowej dla obciążeń obliczeniowych: a) w strefie przypodporowej; b) w najbardziej wyężonym przekroju poziomym

z uwagi na utratę stateczności. Należy zaznaczyć, że w prezentowanym przykładzie normowy parametr s nie mieścił się w zadanym w normie przedziale i do obliczeń przyjęto $s = 0,5$, o czym szerzej napisano w [4]. Autorzy sugerują, że w przypadku szacowania nośności powłok podpartych dyskretnie można w uproszczeniu przyjmować $s = 0,5$ w celu uniknięcia konieczności wykonywania analiz numerycznych. Wykorzystanie nośności płaszczu, z uwagi na stateczność przy zadanych obciążeniach obliczeniowych, wynosiło 98%. Uzyskano obliczeniową reakcję podporową równą 2271 kN, co oznacza, że maksymalne reakcje obliczeniowa i charakterystyczna, przy normowym współczynniku obciążeń $\gamma_F = 1,5$ wynoszą: $R_4 = 2271/0,98 = 2317 \text{ kN}$, $R_{4k} = 2317/1,5 = 1545 \text{ kN}$.

Obliczenia numeryczne GMNIA zgodnie z EN 1993-1-6

Opisane w [1] analizy numeryczne GMNIA dotyczyły tego samego silosu, co pozwala na bezpośrednie porównywanie wyników. Wyężenie powłoki wynosiło wg [1] 51,6% przy reakcji obliczeniowej $R = 2271 \text{ kN}$. Tak więc maksymalne reakcje obliczeniowa i charakterystyczna wynoszą: $R_5 = 2271/0,516 = 4401 \text{ kN}$, $R_{5k} = 4401/1,5 = 2934 \text{ kN}$. Trzeba jednak pamiętać, że w reakcji podpory całego silosu znaczny udział miało obciążenie przekazywane na podporę przez lej. W zaprezentowanych uproszczonych obliczeniach wyznaczano reakcję na podporę, która pocho-

dzi tylko od obciążenia płaszcza silosu. Jeśli przeprowadzi się analizę nośności powłoki metodą GMNIA (analogiczną do [1]), z uwzględnieniem wyłącznie obciążenia płaszcza od materiału wypełniającego, to uzyskaną reakcję krytyczną będzie można bezpośrednio porównać z wynikami otrzymanymi z wcześniej opisanych analiz. Maksymalne reakcje (obliczeniowa i charakterystyczna) w takim przypadku wynoszą: $R_s = 3312 \text{ kN}$, $R_{sk} = 3312/1,5 = 2208 \text{ kN}$.

Podsumowanie

Norma PN-EN 1993-1-6 wraz z normą PN-EN 1993-4-1 wprowadzają sporo zmian do tradycyjnie pojmowanego wymiarowania silosów, szczególnie (choć nie tylko) w zakresie wymiarowania powłok z uwagi na utratę stateczności. Mimo iż przedstawione w normach metody nie są wolne od niejasności i pewnych mankamentów (szerzej opisanych w [4]), to należy podkreślić, że normy są przełomowe, gdyż pozwalają na wymiarowanie konstrukcji całkowicie w sposób numeryczny. Wadą opisywanych w nich metod jest to, że nawet przy obliczeniach ręcznych potrzebne są dane uzyskiwane numerycznie, co znacznie wydłuża czas obliczeń.

Porównanie wyników uzyskanych z różnych analiz

Charakterystyka	PN/B-03202	Samuleson, Eggwertz [2]	Hotała [3]	EN-1993-4-1 (ręcznie)	EN 1993-1-6 (numerycznie GMNIA) [1]
Reakcja charakterystyczna R	970 kN	1134 kN	1248 kN	1545 kN	2208 kN
Uzyskana reakcja R w stosunku do reakcji R z analizy GMNIA	0,44	0,51	0,57	0,70	1,00

W artykule przedstawiono kilka metod ręcznego wymiarowania powłok, przydatnych przy szacowaniu ich nośności (tabela). Każda z metod obliczenia reakcji krytycznej R podpory płaszcza silosu daje bezpieczne oszacowanie nośności. Przy założeniu, że nie wykonuje się obliczeń numerycznych i wartość $s = 0,5$ [4], obliczenia ręczne opisane w EN 1993-4-1 dają najbardziej zbliżoną do rzeczywistej nośność powłoki analizowanego płaszcza. Warto jednak zaznaczyć, że w przypadku obliczeń numerycznych GMNIA uzyskano znacznie większą nośność. Może się zdarzyć, że różnica między obliczeniami ręcznymi a numerycznymi będzie jeszcze większa, co opisano w [5]. Należy podkreślić, iż mimo dużego nakładu pracy potrzebnego do wykonania analiz numerycznych,

umożliwiają one optymalizację konstrukcji płaszczy silosów.

Literatura

- [1] Hotała E., Skotny Ł., Drużbiak I., Boniecka J.: Analiza zachowania się stalowego płaszcza silosu wg różnych procedur normowych, Materiały Budowlane nr 5/2014.
- [2] Samuelson L. A., Eggwertz S., Shell Stability Handbook, Elsevier Applied Science, London and New York, 1992.
- [3] Hotała E.: Nośność graniczna nieuzębrowanych cylindrycznych płaszczy silosów stalowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2003.
- [4] Hotała E., Skotny Ł.: Stan graniczny niestateczności walcowych powłok silosów stalowych opartych na podporach odcinkowych, Materiały Budowlane nr 1/2014.
- [5] Sadowski A. J., Rotter J. M.: Steel silos with different aspect ratios: I – Behaviour under concentric discharge, Journal of Constructional Steel Research Vol. 67, Elsevier 2011.

PRZEDSIĘBIORSTWO ROBÓT INSTALACYJNYCH

INSBUD Sp. z o.o. 59-900 Zgorzelec, ul Podwale 12a
tel. (75) 775-26-56, fax. (75) 775-29-23
biuro@insbudzgorzelec.pl, www.insbudzgorzelec.pl

- projektowanie i wykonawstwo instalacji i sieci wod.-kan., c.o.
- roboty ogólnobudowlane
- budownictwo mieszkaniowe
- przemysłowe
- hale
- budowa stacji paliw
- konstrukcje betonowe
- żelbetowe
- budowle hydrotechniczne
- roboty melioracyjne i drogowe
- przeciski pod drogą
- wynajem sprzętu budowlanego
- szalunki systemowe,
- maszyny



Remonty Przedsiębiorstwo Budowlano-Usługowe
Elektryka
Budownictwo
Usługi
Sprząt

REBUS

59-900 Zgorzelec, ul. Rzeczki Górne 19

NIP 615 100 35 02 tel/fax (075) 77 52 824 e-mail: rebus999@wp.pl

Zakres naszej działalności obejmuje:

- wykonywanie robót ogólnobudowlanych związanych ze wznoszeniem budynków
- roboty związane z wykonaniem fundamentów, reprofiliacje, iniekcje i naprawy betonów
- wykonywanie konstrukcji i pokryć dachowych
- wykonywanie elewacji oraz dociepleń budynków
- roboty termoizolacyjne na obmurzach pieców, okładziny żaro i ognioodporne
- rozbiórka i burzenie obiektów budowlanych
- wykonywanie robót budowlanych w zakresie wznoszenia konstrukcji stalowych
- budowa dróg oraz ciągów komunikacyjnych
- wynajem maszyn i sprzętu budowlanego z obsługą operatorską

Dysponujemy sprzętem ciężkim takim jak: koparki, koparkoładowarki, samochody.
Posiadamy różnego rodzaju systemy rusztowań oraz szalunki systemowe.