

## Przykłady projektowania stalowych konstrukcji powłokowych według Eurokodów

Marek Piekarczyk <sup>1a</sup>, Tomasz Michałowski <sup>1b</sup>, Dawid Kowalczyk <sup>1c</sup>

<sup>1</sup>Katedra Konstrukcji Metalowych,  
Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska  
ul Warszawska 24, 31-155 Kraków

<sup>a</sup>e-mail: [mpiekar@usk.pk.edu.pl](mailto:mpiekar@usk.pk.edu.pl)

<sup>b</sup>e-mail: [tmichal@usk.pk.edu.pl](mailto:tmichal@usk.pk.edu.pl)

<sup>c</sup>e-mail: [kowalczyk.dawid@o2.pl](mailto:kowalczyk.dawid@o2.pl)

### Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę wytycznych norm europejskich dotyczących procedur obliczeniowych konstrukcji powłokowych. Analiza zilustrowana została przykładami obliczeniowymi dotyczącymi trzech konstrukcji, a to komina, silosu i zbiornika.

### Abstract

The paper presents an analysis of the guidelines of the European standards on procedures for calculation of shell structures. Analysis of calculation is illustrated by examples concerning three structures of the type i.e. a chimney, a silo and a tank.

*Słowa kluczowe: konstrukcje metalowe, konstrukcje powłokowe, komin, silos, zbiornik*  
*Keywords: steel structures, shell structures, chimney, silo, tank*

### 1. Wstęp

W pracy zestawiono wybrane przykłady projektowania konstrukcji stalowych, które jako powłoki obrotowe podlegają przepisom normy PN-EN 1993-1-6 [10], chociaż są trzema odmiennymi rodzajami budowli, dla których opracowano przepisy szczegółowe: dla kominów w normie PN - EN 1993-3-2 [11], silosów w PN-EN 1993-4-1 [12], zbiorników w PN-EN 1993-4-2 [13].

W polskiej praktyce projektowej każdy z tych trzech rodzajów konstrukcji stalowych projektowano do niedawna (2010) w oparciu o odpowiednie normy przedmiotowe, a to kominy według PN-93 / B 03201 [7], silosy na materiały sypkie PN-B-03202: 1996 [8], walcowe zbiorniki pionowe na ciecz PN-B-03210: 1997 [9]. Każdemu z tych typów konstrukcji poświęcone były w literaturze polskiej, w zakresie ich obliczeń statycznych i wymiarowania, odpowiednie monografie, by wymienić przykładowo [14], [5] dla kominów, [15] silosów czy [16] zbiorników.

Najistotniejszą zmianą w stosunku do tradycyjnego ujęcia zagadnień projektowania przedmiotowych konstrukcji powłokowych jest integracja przepisów w zakresie sprawdzania ich wytrzymałości i stateczności w oparciu o jednolite podejście dla tych wszystkich konstrukcji powłokowych, wskazane w normie [10] i opisane w komentarzu do niej [2].

### 2. Rodzaje analizy konstrukcji powłokowych

Norma [10] określa cztery miarodajne stany graniczne powłok stalowych i wskazuje, jakimi metodami należy wyznaczać obliczeniowe wartości naprężeń i sił przekrojowych w danym stanie, według wzorca zestawionego tu w tabeli 1.

### 1. Introduction

The chosen design examples of steel structures are set up in the paper which all as shells of revolution are subject to the rules of the standard PN-EN 1993-1-6 [10] though they belong to the various types of buildings for which detailed regulations were elaborated: for chimneys in the code PN-EN 1993-3-2 [11], silos in PN-EN 1993-4-1 [12] and tanks in PN-EN 1993-4-2 [13].

Recently (2010) in the Polish project practice each of the three types of steel structures has been designed according to adequate object standards, i.e. chimneys after PN-93 / B 03201 [7], silos for loose materials PN-B-03202: 1996 [8], cylindrical vertical tanks PN-B-03210: 1997 [9]. Corresponding comprehensive monographs have been dedicated to every type of the structure in the Polish literature, like [14], [5] for chimneys, [15] silos or [16] tanks; these are mentioned here only for instance.

The most essential change in comparison to the traditional attitude to the design procedures of the considered shell structures is the integration of the rules within the range of their strength and stability check on the base of the uniform approach to all the shell structures shown in the standard [10] and described in the commentary to it [2].

### 2. Types of analysis of shell structures

The standard [10] defines four basic limit states for steel shell structures and shows the methods that shall be used in order to determine the values of stresses and cross-sectional forces in the given state according to the pattern set up here in table 1.

Tabela 1. Metody (modele) analizy dla poszczególnych stanów granicznych powłok [10].

Stan graniczny (nazwa)	Metoda (model) analizy
LS1 (zniszczenie plastyczne)	Analiza liniowo sprężysta (LA) analiza fizycznie nieliniowa (MNA), analiza fizycznie i geometrycznie nieliniowa (GMNA)
LS2 (nieprzystosowanie plastyczne – zmęczenie niskocyklowe)	Analiza LA lub GNA, analiza plastyczna (nieliniowa fizycznie) MNA lub GMNA
LS3 (niestateczność - wyobczenie)	Analiza LA, analiza liniowo sprężysta bifurkacyjna (LBA), analiza fizycznie nieliniowa MNA, analiza geometrycznie i fizycznie nieliniowa z imperfekcjami GMNIA
LS4 (zmęczenie)	Analiza LA lub GNA z zastosowaniem odpowiednich współczynników spiętrzenia naprężeń

Table 1. Methods (models) of analysis for each limit states of shells [10].

Limit state (name)	Method (model) of analysis
LS1 (plastic limit state)	Linear elastic analysis (LA), materially nonlinear analysis (MNA), geometrically and materially nonlinear analysis (GMNA)
LS2 (cyclic plasticity limit state)	Analysis LA or GNA, materially nonlinear analysis MNA or GMNA
LS3 (buckling limit state)	Analysis LA, linear elastic bifurcation analysis (LBA), materially nonlinear analysis MNA, geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections GMNIA
LS3 (fatigue limit state)	Analysis LA or GNA with coefficients of stress concentration

Uwzględnienie wpływu imperfekcji prowadzi do rozbudowanej analizy konstrukcji geometrycznie nieliniowej (GNIA) oraz geometrycznie i fizycznie nieliniowej z imperfekcjami (GMNIA).

Dla danego stanu granicznego i w zależności od zastosowanej metody analizy stanu wyężenia w powłoce podane są w powołanej normie warunki wymiarowania, i tak przykładowo dla stanu LS1 (zniszczenia plastycznego):

$$\sigma_{Ed} \leq f_{yk} / \gamma_{m0} \tag{1}$$

gdzie  $\sigma_{Ed}$  - wartość obliczeniowa składowej naprężenia lub naprężenia zastępczego,  $f_{yk}$  - charakterystyczna granica plastyczności,  $\gamma_{m0} = 1,0$ ; a dla stanu LS3:

$$\sigma_{Ed} \leq \chi f_{yk} / \gamma_{M1} \tag{2}$$

gdzie  $\chi$  - współczynnik niestateczności,  $\gamma_{M1} = 1,0$ .

Wyboru odpowiedniej metody obliczeń dla danego rodzaju konstrukcji dokonuje się według przypisanej doń normy projektowej dla silosów i zbiorników z uwagi na klasę konsekwencji (zniszczenia), która z kolei zależy od geometrii budowli i warunków pracy [12], [13]. W przypadku kominów [11] metoda analizy zależy od klasy przekroju. Dla klas 1-3 powłokę traktuje się jako uogólnioną belkę z efektami zgięciowymi i ewentualnie uwzględnieniem efektów II rzędu, a przekroje w klasie 4 liczy się jak powłoki, stosując analizę liniową LA.

### 3. Przykłady obliczeniowe konstrukcji powłokowych

3.1. Komin stalowy w elektrociepłowni Łęg (Kraków) [6] w klasie konsekwencji CC2

Account for the influence of imperfections results in the advanced analysis of a geometrically (GNIA) or a geometrically and physically nonlinear structure with imperfections (GMNIA).

For the chosen limit state and in accordance with the used method of analysis of the effort in the shell conditions for dimensioning are given in the above mentioned standards and for instance in the state LS1 (plastic limit) as follows:

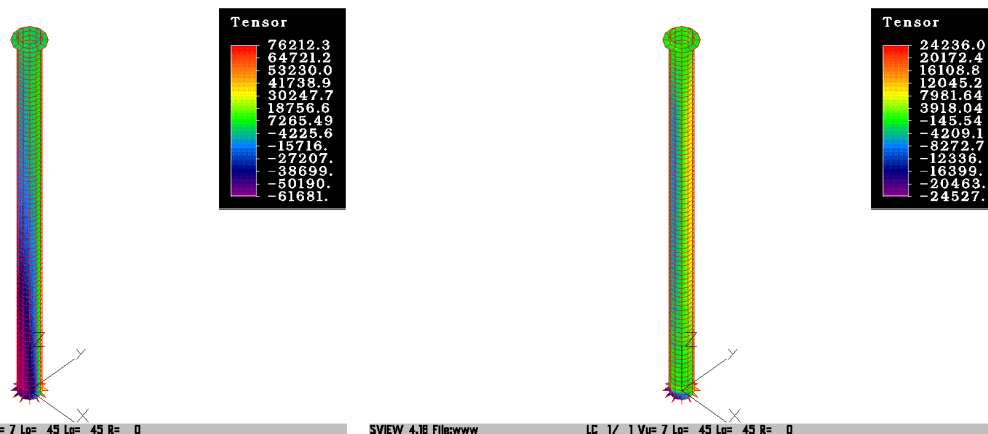
where  $\sigma_{Ed}$  - design value of a component of stress tensor or equivalent stress,  $f_{yk}$  - characteristic value of yield strength,  $\gamma_{m0} = 1.0$ ; while for the state LS3:

where  $\chi$  - coefficient of instability,  $\gamma_{M1} = 1.0$ .

The choice of the appropriate calculation method for a given type of the structure is done in accordance with the corresponding standard for silos and tanks with respect to the class of consequence (of failure) which in turn depends on the geometry of the structure and the conditions of its exploitation [12], [13]. In the case of chimneys [11] the method of analysis depends on the class of a cross-section. For classes 1-3 the shell is considered like a generalized beam with bending effects and possibly taking the II-range effects into account whereas cross-section of the class 4 are treated like shells with use of a linear analysis LA.

### 3. Design examples of shell structures

3.1. Steel chimney in electric power station Łęg (Cracow) [6], consequence class CC2



Rys. 1. Przykładowe wyniki obliczeń komina o wysokości 80 m dla obciążenia ciśnieniem prędkości wiatru; a - naprężenia południkowe, b - naprężenia obwodowe (Algor [1]), analiza LA [kPa].

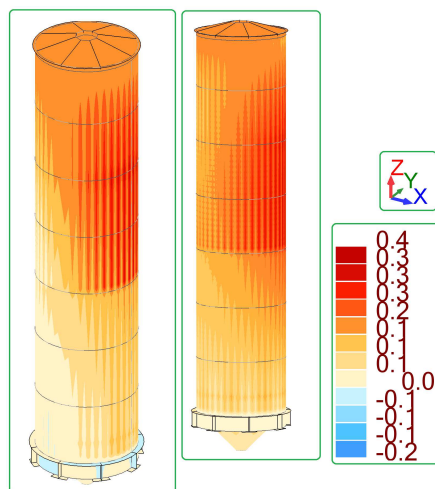
Fig. 1. Example design results for the chimney 80 m high for the pressure of wind velocity, a) meridional stresses, b) circumferential stresses (Algor [14], LA analysis [kPa]).

Stan graniczny (warunek)	Sprawdzenie
LS1 (1)	0,220 < 1,0
LS3 (2)	0,760 < 1,0

Limit state (condition)	Check
LS1 (1)	0.220 < 1.0
LS3 (2)	0.760 < 1.0

3.2. Silos z blachy płaskiej w klasie konsekwencji CC2

3.2. Silo from flat sheets in the consequence class CC2



Rys. 2. Silos na pszenicę, przykładowe wyniki MES [4], przemieszczenia  $u_x$  (po lewej), całkowite (po prawej) [cm], analiza LA.

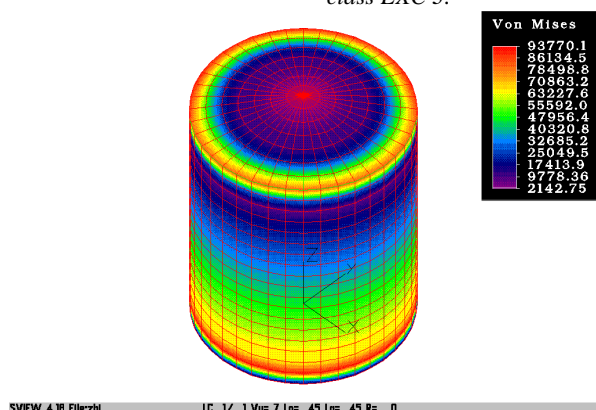
Fig. 2. Silo for wheat, example FEM results [4], displacements  $u_x$  (left), general (right) [cm], LA analysis.

Stan graniczny (warunek)	Sprawdzenie
LS1 (1)	0,277 < 1,0
LS3 (2)	0,907 < 1,0

Limit state (condition)	Check
LS1 (1)	0.277 < 1.0
LS3 (2)	0.907 < 1.0

3.3. Zbiornik na wodę amoniakalną w klasie konsekwencji CC3; klasa wykonania EXC3.

3.3 Tank for ammonia water, consequence class CC3; execution class EXC 3.



Rys. 3. Wyniki obliczeń MES (Algor [1]) dla najbardziej niekorzystnego wyężenia max  $\sigma_{HMH}$  [3], analiza LA, [kPa].  
 Fig. 3. Results of calculations (Algor [1]) for the most disadvantageous equivalent stress [3], LA analysis, [kPa].

Stan graniczny (warunek)	Sprawdzenie
LS1 (1)	0,723 < 1,0
LS3 (2)	0,095 < 1,0

Limit state (condition)	Check
LS1 (1)	0.723 < 1.0
LS3 (2)	0.095 < 1.0

Współczynniki bezpieczeństwa: dla wody amoniakalnej  $\gamma_F = 1,40$ , dla obciążeń zmiennych  $\gamma_F = 1,50$ , dla ciężaru własnego  $\gamma_F = 1,35$ ,  $\gamma_{M0} = 1,10$ ,  $\gamma_{M2} = \gamma_{M5} = 1,25$ ,  $\gamma_R = 1,05$ ,  $k_{Fi} = 1,10$  (współczynnik dla obciążeń dla RC3).

Safety factors: for ammonia water  $\gamma_F = 1.40$ , other live loads  $\gamma_F = 1.50$ , for dead weight  $\gamma_F = 1.35$ ,  $\gamma_{M0} = 1.10$ ,  $\gamma_{M2} = \gamma_{M5} = 1.25$ ,  $\gamma_R = 1.05$ ,  $k_{Fi} = 1.10$  (factor for actions for RC3).

#### 4. Podsumowanie

Przedstawiono trzy przykłady projektowania stalowych konstrukcji specjalnych z blach o przekroju powłoki obrotowej. W obliczeniach powłok wykorzystano efektywnie we wszystkich przypadkach MES dla analizy stanu naprężenia (wyężenia) i przemieszczeń powłok oraz algorytm opisany normą [10].

#### 4. Summary

Three design examples of steel special structures from sheets with the shell of revolution cross-section are shown. In all the cases FEM as well as the algorithm described in standar [10] were effectively used for the analysis of the stress state (effort) and displacements of the shells.

#### Literatura • References

[1] Błazik-Borowa E. et al, *Przykłady rozwiązywania zadań z mechaniki konstrukcji za pomocą systemu Algor*, IZT Lublin 2000.  
 [2] ECCS, *Buckling of steel shells. European Design Recommendations, 5th edition*, 2008.  
 [3] Gwóźdź M., Michałowski T., *Elementy niezawodności stalowych spawanych zbiorników na ciecze i gazy płynne*, Przegląd spawalnictwa, 3/2012.  
 [4] Kowalczyk D., *Projekt stalowego silosu z blachy płaskiej wykonanego w klasie konsekwencji CC2*, praca dyplomowa magisterska, promotor T. Domański, Politechnika Krakowska, Kraków 2013.  
 [5] Meller M., Pacek M., *Kominy przemysłowe*, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.  
 [6] Michałowski T., *Calculations for an example chimney in electric power station in Cracow* (in Polish - manuscript 2013).  
 [7] PN-93 / B 03201 *Konstrukcje stalowe. Kominy. Obliczenia i projektowanie*.  
 [8] PN-B-03202: 1996 *Konstrukcje stalowe. Silosy na materiały sypkie. Obliczenia statyczne i projektowanie*.  
 [9] PN-B-03210: 1997 *Konstrukcje stalowe. Zbiorniki walcowe pionowe na ciecze. Projektowanie i wykonanie*.  
 [10] PN-EN 1993-1-6 : 2007 *Projektowanie konstrukcji stalowych. Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych*.  
 [11] PN-EN 1993-3-2: 2006 *Projektowanie konstrukcji stalowych. Wieże maszty, kominy. Kominy*.  
 [12] PN-EN 1993-4-1: 2007 *Projektowanie konstrukcji stalowych. Silosy*.  
 [13] PN-EN 1993-4-2: 2009 *Projektowanie konstrukcji stalowych. Zbiorniki*.  
 [14] Rykaluk K., *Konstrukcje stalowe, kominy, wieże, maszty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.  
 [15] Ziółko J., Włodarczyk W., Mendera Z., Włodarczyk S., *Stalowe konstrukcje specjalne*, Arkady, Warszawa 1995.  
 [16] Ziółko J., *Zbiorniki metalowe na ciecze i gazy*, Arkady, Warszawa 1986.