

BUILDER
FOR THE
FUTUREBUILDER
FOR THE
YOUNG
ENGINEERS

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.

Joanna Klimiuk
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Politechnika Wrocławska

OPIEKUN NAUKOWY
dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWR
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Politechnika Wrocławska

Wprowadzona kilka lat temu norma europejska PN-EN 1993-4-1 jako pierwsza w historii pozwoliła na numeryczne obliczanie konstrukcji silosów stalowych. Stąd wraz z jej wprowadzeniem możliwe stało się przeanalizowanie wielu zjawisk, których nie da się analizować podczas obliczeń analitycznych.

Na nośność powłoki wpływać może niemal wszystko, włączając w to również sposób jej uźebrowania. Z praktyki inżynierskiej wynika, że sztywniejsze (lub też po prostu większe) żebra powodować mogą większą koncentrację naprężeń w powłoce, przyczyniając się do jej szybszej utraty stateczności. Żebra powinny mieć więc taki przekrój poprzeczny, żeby (razem z odpowiednim wycinkiem powłoki) przenosiły reakcję podporową bez zbędnych rezerw nośności.

W początkowej części artykułu poddano sprawdzeniu, jak na nośność powłoki wpływają dwie główne charakterystyki żeber: pole przekroju poprzecznego oraz ich moment bezwładności względem promienia powłoki. W części drugiej spróbowano zbadać, jakie inne charakterystyki (oraz w jakim stopniu) wpływają na nośność powłoki.

Geometria modelu

Na potrzeby opracowania przyjęto, że analizowany jest płaszcz silosu o następujących parametrach: moduł Younga stali: $E = 210$ GPa, współczynnik Poissona: $\nu = 0,3$, granica plastyczności stali $f_y = 235$ MPa, promień silosu: $r = 5,0$ m, wysokość płaszczka silosu: $h = 22,0$ m, grubość płaszczka $t_p = 8,0$ mm. Silos oparty jest symetrycznie w sposób przegubowy na sześciu słupach za pośrednictwem fartucha o długości $l_f = 3,75$ m i grubości blach: $t_f = 10,0$ mm. W toku obliczeń zmieniano geometrię żeber, badając wpływ momentu ich bezwładności oraz pola przekroju poprzecznego na nośność powłoki silosu. W celu eliminacji innych wpływów skupiono się na analizie samego płaszczka silosu pozabawionego leja.

Silos obciążono jedynie obciążeniem pionowym, przyłożonym liniowo do górnej krawędzi powłoki. Wykorzystano symetrię osiową modelu,

Na nośność powłoki mniejszy wpływ mają charakterystyki geometryczne żeber, największe różnice w wynikach obliczeń powoduje zmienianie liczby źródeł koncentracji naprężeń w powłoce.

GEOMETRIA ŻEBER, A NOŚNOŚĆ SILOSU

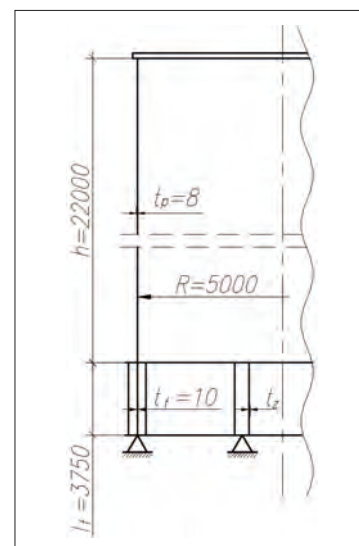
W artykule przeanalizowano wpływ geometrii żeber na nośność powłoki stalowego silosu z blachy gładkiej opartego na słupach za pośrednictwem fartucha.

co pozwoliło na analizę jedynie 1/6 silosu. Wszystkie części składowe konstrukcji zamodelowano za pomocą powłokowych czterowzłowych elementów skończonych typu S4. Taki model poddano analizie zgodnie z Eurokodem 1993-1-6.

Założono, że wpływ na nośność powłoki może mieć pole przekroju żeber lub też ich moment bezwładności względem promienia powłoki. Podzielono więc rozwiązania żeber na te o stałym sumarycznym polu przekroju i na te o stałym momencie bezwładności. W celu wyeliminowania pozostałych wpływów uznano, że całkowity rozstaw żeber jest stały i wynosi: $h_0 = 400$ mm. Przyjęto również, że szerokość żeber b_s jest równa szerokości pierścienia i wynosi $b_s = 300$ mm. Analizowane rozwiązania przedstawiono na rys. 2.

Dla każdego z przedstawionych rozwiązań przeprowadzono analizy GNA (analiza geometrycznie nieliniowa), MNA (analiza materiałowo nieliniowa) oraz GMNA (analiza geometrycznie i materiałowo nieliniowa). Jednak jako że w analizowanym modelu wyczerpanie nośności następuje poprzez utratę stateczności, plastyczność stali nie ma większego wpływu na wyniki, a ścieżki analiz GNA i GMNA praktycznie pokrywają się ze sobą. Dlatego też w opracowaniu przedstawiono jedynie wyniki analiz GMNA.

Dodatkowo uznano, że geometria żeber o sumarycznym polu przekroju $A_0 = 33000$ mm² oraz momencie bezwładności $I_{z0} = 9,610 \cdot 10^{-8}$ mm⁴ stanowi punkt odniesienia. Mnożnik obciążenia dla tego modelu uzyskany z analizy GMNA: $r_{GMNA} = 314278$ kN uznano za wartość porównawczą: $R=1,0$ i do niego odnoszono pozostałe wyniki.



Rys. 1. Schemat geometrii analizowanego silosu
Fig. 1. Analyzed silo geometry

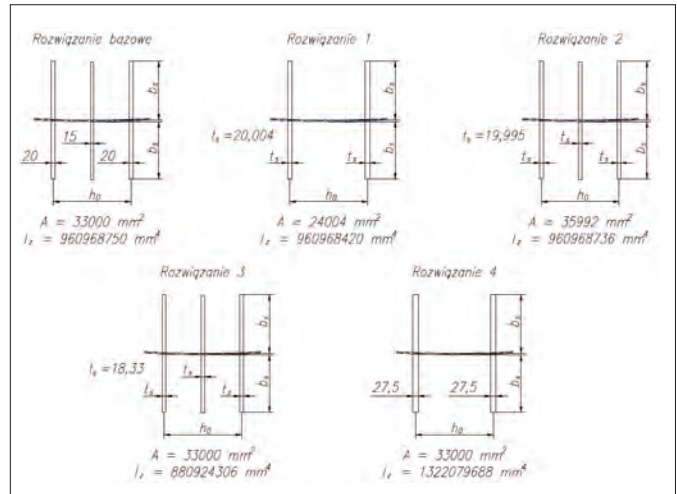
Wpływ sumarycznego pola przekroju żeber na nośność powłoki

W pierwszej kolejności badano rozwiązania żeber o takim samym momencie bezwładności ($I_{z0} = 9,610 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^4$) i różnych polach przekroju A. W tab. 1. zestawiono otrzymane wyniki, a na rys. 3. otrzymane ścieżki równowagi statycznej.

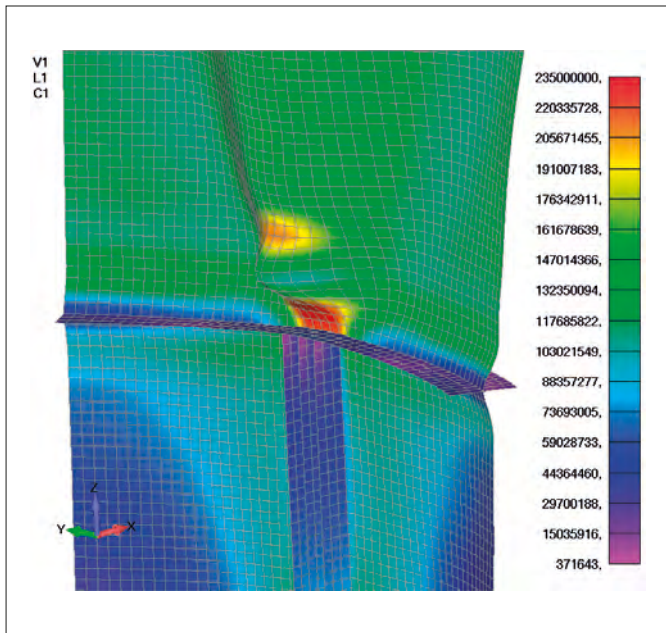
Zgodnie z oczekiwaniami można zauważyć, że im większe pole przekroju żeber, tym mniejsza jest nośność powłoki silosu. Wynika to z faktu, że większe żebra wpływają na większą koncentrację naprężeń nad słupem (czyli w miejscu, w którym następuje zniszczenie powłoki). Dziwić może wielkość tego wpływu: zwiększenie pola przekroju poprzecznego żeber o 9% spowodowało spadek nośności powłoki o nieco ponad 1%! Wpływ więc istnieje, jest jednak stosunkowo niewielki. Schemat zniszczenia wszystkich modeli jest jednakowy – wyczerpanie nośności następuje w wyniku utraty stateczności powłoki nad strefą uźebrowania.

Wpływ momentu bezwładności żeber na nośność powłoki

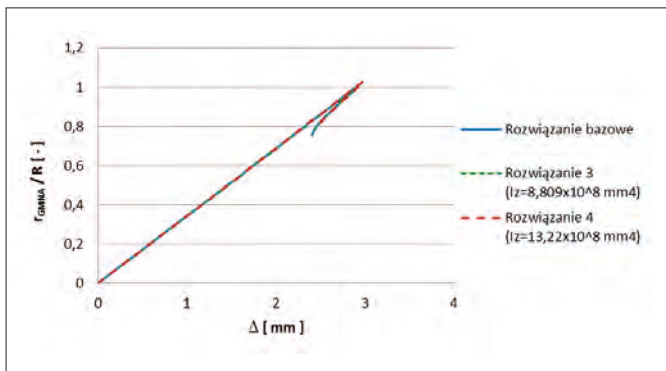
W następnej kolejności badano więc wpływ momentu bezwładności I_z żeber na nośność powłoki (przy założonym stałym polu przekroju A_0). Po raz kolejny otrzymane wyniki zestawiono w tab. 2., a ścieżki równowagi statycznej – na rys. 5.



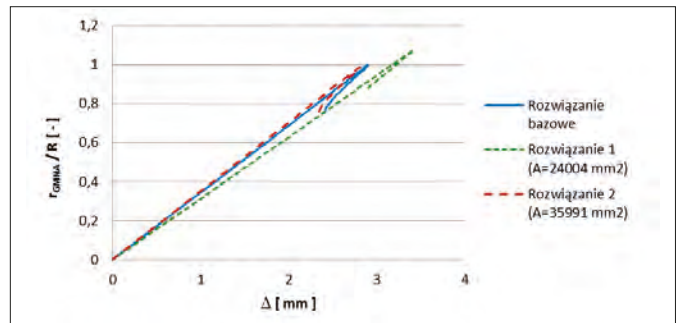
Rys. 2. Schemat geometrii analizowanych żeber
Fig. 2. Analyzed support stringers geometry



Rys. 4. Naprężenia von Misesa (w Pascalach) w zdeformowanym modelu bazowym po zniszczeniu (utracie stateczności)
Fig. 4. von Mises stress state in basic model after its failure



Rys. 5. Ścieżki równowagi statycznej modeli o stałym polu przekroju żeber A_0 i o różnych momentach bezwładności I_z
Fig. 5. Stability paths of models with different moment of inertia of support stringers



Rys. 3. Ścieżki równowagi statycznej modeli o stałym momencie bezwładności żeber I_{z0} i o różnych polach przekroju A
Fig. 3. Stability paths of models with different cross sectional area of support stringers

Tablica 1. Mnożniki obciążenia r_{GMNA} uzyskane z analiz modeli z żebrami o różnych polach przekroju A

Table 1. Load multipliers r_{GMNA} of models with different cross sectional area of support stringers

Numer rozwiązania	A [mm ²]	A/A ₀ [-]	r_{GMNA}/R [-]
1	24004	0,727	1,075
Bazowe	33000	1,000	1,000
2	35991	1,091	0,988

Tablica 2. Mnożniki obciążenia r_{GMNA} uzyskane z analiz modeli z żebrami o różnych momentach bezwładności I_z

Table 2. Load multipliers r_{GMNA} of models with different moment of inertia of support stringers

Numer rozwiązania	I_z [mm ⁴]	I_z/I_{z0} [-]	r_{GMNA}/R [-]
3	880924306	0,917	0,999
bazowe	960968750	1,000	1,000
4	1322079688	1,376	1,029

Tablica 3. Mnożniki obciążenia r_{GMNA} uzyskane z analiz modeli z żebrami o różnych geometriach

Table 3. Load multipliers r_{GMNA} of models with different support stringers geometry

Numer rozwiązania	r_{GMNA}/R [-]
bazowe	1,000
5	0,968
6	0,990
7	1,049

O ile wpływ pola przekroju żeber był niewielki, to wpływ samego momentu ich bezwładności jest pomijalnie mały. Minimalny wzrost nośności wraz ze wzrostem momentu bezwładności można tłumaczyć tym, że większy moment bezwładności (przy stałym polu) oznacza większe rozrzucenie masy od środka żeber, a więc mniejszą koncentrację naprężeń.

Inne geometrie żeber – co ma wpływ na nośność?

Skoro zarówno pole przekroju żeber, jak i ich moment bezwładności względem promienia mają niewielki wpływ na nośność powłoki silosu, warto zastanowić się, co właściwie z innymi cechami geometrycznymi. W ostatnim kroku przeanalizowano więc inne rozwiązania żeber, przy założeniu, że mają one zawsze to samo pole przekroju poprzecznego A_0 oraz ten sam moment bezwładności względem promienia powłoki I_{z_0} . Konsekwentnie pozostawiono również ich stały rozstaw $h_0 = 400$ mm. Przyjęto natomiast, że uźebrowanie mogą stanowić również ceowniki. Ponadto zmieniano szerokość żeber b_s . Ponownie uzyskane wyniki odniesiono do tych otrzymanych z analizy rozwiązania bazowego. Analizowane propozycje uźebrowań przedstawiono na rys. 6., natomiast wyniki obliczeń w tab. 3. oraz na rys. 7.

Rozwiązanie piąte polegało przede wszystkim na sprawdzeniu wpływu na nośność powłoki szerokości żeber b_s , a co za tym idzie – ich momentu bezwładności względem osi stycznej do płaszcza silosu. Zmniejszenie szerokości b_s o 50% spowodowało spadek mnożnika obciążenia o zaledwie 3%, co pozwala uznać, że również ta charakterystyka nie ma istotnego znaczenia.

W propozycjach 6 i 7 zastosowano uźebrowania z przekrojów ceowych. Warto zauważyć, że zastosowanie otwartych przekrojów ceowych praktycznie nie zmieniło wyników. Natomiast te same przekroje zastosowane w sposób zamknięty spowodowały wzrost mnożnika obciążenia o prawie 5%. Wynika to z innego rozłożenia naprężeń w powłoce, co widać na rys. 8.

W przypadku uźebrowania o przekroju otwartym w powłoce tworzy się jedna koncentracja naprężeń, w przypadku uźebrowania zamkniętego – tworzą się dwa źródła koncentracji naprężeń, co w efekcie prowadzi do późniejszej utraty stateczności. Tak naprawdę znaczenie ma tutaj nie tyle sam przekrój ceowy, co liczba punktów przekazywania sił z żeber na płaszc. Faktycznie również w wynikach pokazanych we wcześniejszych częściach artykułu można zauważyć, że za każdym razem mnożnik obciążenia r_{GMNA} był większy dla rozwiązania z dwoma żebrami niż dla rozwiązania z trzema.

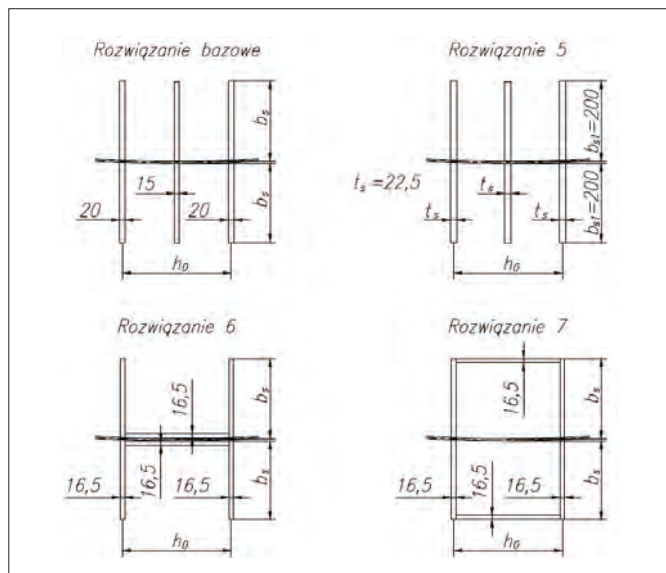
Podsumowanie

Ze względu na otrzymywane z analiz GMNA niemalże jednakowe schematy zniszczenia modelu zrezygnowano z przeprowadzenia analiz z uwzględnieniem imperfekcji, uznając, że wpływ imperfekcji będzie porównywalny dla wszystkich proponowanych rozwiązań.

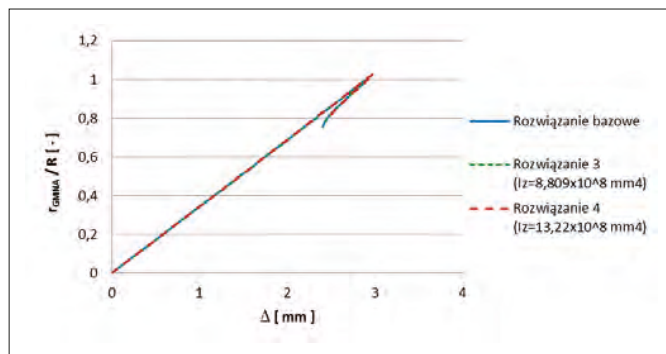
Z całą pewnością należy zauważyć, że wpływ charakterystyk geometrycznych żeber na nośność powłoki okazał się mniejszy niż oczekiwało. Zdecydowanie największe różnice w wynikach obliczeń powoduje zmienianie liczby źródeł koncentracji naprężeń w powłoce. Z całą pewnością istotny wpływ na nośność powłoki może mieć również całkowita szerokość uźebrowania h_0 , czemu warto przyrzeć się w przyszłych pracach.

Bibliografia

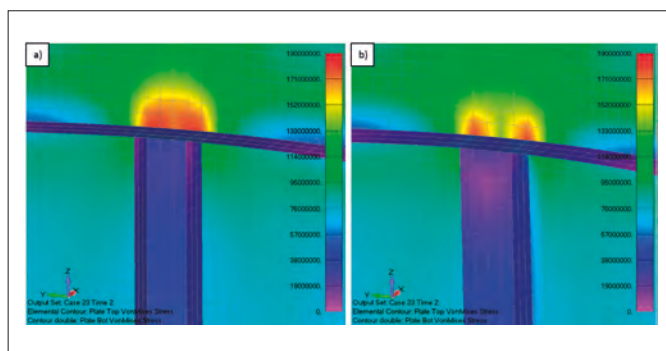
[1] Doerich, C.: Strength and Stability of locally supported cylinders. Edinburgh, The University of Edinburgh, 2007 [rozprawa doktorska].
 [2] Hotala E., Skotny Ł.: Stateczność walcowych płaszczy silosów stalowych uźebrowanych nad podporami odcinkowymi. „Przegląd Budowlany”, nr 5, 2012, s. 119-122.
 [3] Hotala E., Skotny Ł.: Stan graniczny niestateczności walcowych powłok silosów stalowych opartych na podporach odcinkowych. „Materiały Budowlane”, nr 1, 2014, s. 46-49.
 [4] Labocha S., Skotny Ł.: Liniowa i nieliniowa analiza MES: implementacja w programie FE-MAP, Wrocław, GM System, 2014.
 [5] Skotny, Ł.: Nośność graniczna uźebrowanych cylindrycznych powłok płaszczy silosów stalowych w strefie podpór odcinkowych. Wrocław, Politechnika Wroclawska, 2011 [rozprawa doktorska].



Rys. 6. Schemat geometrii analizowanych żeber
 Fig. 6. Analyzed support stringers geometry



Rys. 7. Ścieżki równowagi statycznej modeli o różnych geometriach żeber
 Fig. 7. Stability paths of models with different support stringers geometry



Rys. 8. Rozkład naprężeń von Misesa (w Pascalach) przy tym samym mnożniku obciążenia dla żeber o przekroju otwartym (a) oraz zamkniętym (b)

Fig. 8. Stress state in models: with open cross section stringers (a) and with closed cross section stringers (b)

Abstract. THE INFLUENCE OF THE SUPPORT STRINGERS CROSS SECTIONAL AREA AND THEIR MOMENT OF INERTIA ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF THE STEEL SILO SHELL. The paper describes the influence of the support stringers geometry on the load-bearing capacity of the discretely supported steel silos shells with skirts. Firstly, the influence of stringers cross sectional area and their moment of inertia were analyzed. Secondly, author examined what other geometrical characteristics may influence on the load-bearing capacity of silo shell. Theoretical considerations were illustrated by an example calculation.