

# Parametryczna analiza wpływu wstępnych imperfekcji geometrycznych na nośność silosu częściowo obciążonego podciśnieniem

W artykule przedstawiono analizę numeryczną osiowo symetrycznego pionowego silosu z aluminium [4, 11]. Przeprowadzone kompleksowe obliczenia są kontynuacją artykułu [2], w którym omówiono wpływ imperfekcji geometrycznych płaszcza na nośność konstrukcji obciążonej podciśnieniem i wiatrem. W opracowaniu [2] pominięto oddziaływanie parcia materiału wypełniającego silos, a więc rozważono najbardziej niekorzystny wariant obciążenia. Imperfekcje geometryczne przyjęto w postaci lokalnej deformacji płaszcza, której wymiary ustalono na podstawie dopuszczalnych odchyłek według norm polskich [7, 8] oraz eurokodu [9]. Analizowano także wpływ imperfekcji całego płaszcza zbiornika, opisanej dwuwymiarowym jednorodnym i niejednorodnym polem losowym.

W kolejnym etapie analizy, przedstawionym w niniejszym artykule, uwzględniono materiał wypełniający silos, który ogranicza zakres oddziaływania podciśnienia. Należy podkreślić, że obciążenie podciśnieniem może pojawić się we wszystkich stadiach eksploatacji konstrukcji. Występuje ono najczęściej wtedy, gdy podczas tąpnięcia przesklepienia materiału wypełniającego zbiornik specjalne klapy podciśnieniowe lub zawory napowietrzające nie zadziałają. Podciśnienie może także wystąpić w zbiorniku w wyniku obniżenia temperatury otoczenia. W przypadku pustego lub częściowo wypełnionego silosu obciążenie podciśnieniem jest najgroźniejsze ze względów bezpieczeństwa i wytrzymałości konstrukcji. Tak jak w artykule [2], imperfekcje przyjęto w postaci pojedynczego wgłębienia normowo określonego. Zbadano także wpływ deformacji całego płaszcza, opisanej pierwszymi postaciami drgań własnych oraz ich złożeniem. Wyniki porównano ze zdefiniowanymi za pomocą skorelowanych i nieskorelowanych pól odchyłkami losowymi podanymi w [2].

## Model numeryczny

Analiza numeryczna dotyczy aluminiowego silosu walcowego o pojemności  $V = 324 \text{ m}^3$  (rys. 1a). W artykule [2]

wykonano obliczenia tej samej konstrukcji. Płaszcz silosu wysokości 25 000 mm jest zakończony stożkowatym dnem w kształcie leja wysokości 3340 mm oraz dachem – kopułą wysokości 536 mm. Grubość blachy płaszcza jest zmienna i wynosi od 4 do 10,5 mm. Dno i dach zostały wykonane z blachy grubości odpowiednio 10,5 oraz 5,5 mm. Płaszcz i dach zaprojektowano z aluminium AlMg<sub>3</sub>, natomiast lej stożkowy z aluminium AlMgSi<sub>1</sub>. Silos jest oparty na ośmiu podporach.

Obliczenia wykonano za pomocą programu SOFiSTiK [10]. Dyskretyzacji powłoki walcowej dokonano trójkątnymi elementami skończonymi (liczba elementów 31 446, liczba węzłów 17 569). Przeprowadzono analizę materiałowo i geometrycznie nieliniową.

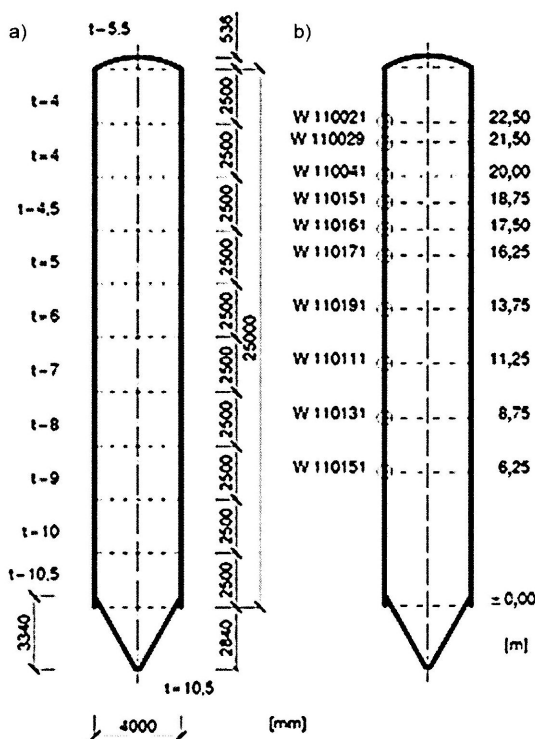
## Imperfekcja geometryczna w postaci pojedynczego wgłębienia

Podobnie jak w [2], na podstawie wytycznych normowych [7÷9] przyjęto

następujące wymiary wstępnego eliptycznego wgłębienia deformującego powłokę: 2000 mm w kierunku obwodowym, 600 mm w kierunku południkowym o strzałce wgniecenia 50 mm. Do opisu deformacji zastosowano funkcję cosinus. Należy podkreślić, że metody obliczania wymiarów wgłębienia według norm [7÷9] są podobne, jednak w eurokodie [9] pojawiają się dodatkowe zalecenia zwiększające jego głębokość.

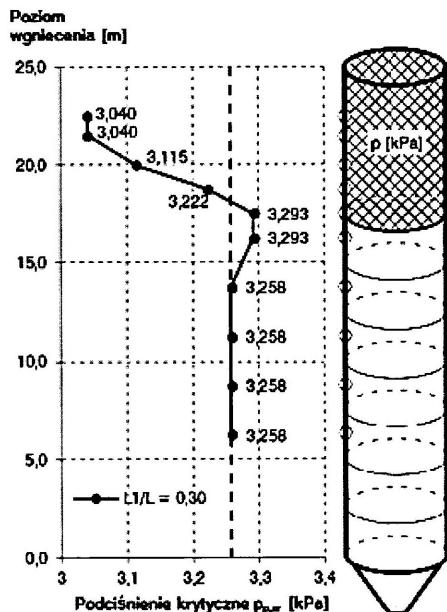
Obliczenia dotyczyły dziesięciu modeli silosu różniących się lokalizacją wgłębienia. Z uwagi na obrotową symetrię konstrukcji zmieniano jedynie wysokość jego położenia. W przypadku każdego modelu wykonano obliczenia, przyjmując dziesięć różnych poziomów wypełnienia (łącznie wykonano obliczenia 100 modeli). Przyjęte położenie wgłębienia oraz wysokości wypełnienia przedstawiono na rys. 1b. W obliczeniach pominięto wpływ parcia materiału wypełniającego silos, przyjęto jedynie, że obciążenie podciśnieniem występuje powyżej wysokości wypełnienia (rys. 2).

Taki uproszczony model zezwala na swobodną deformację płaszcza zbiornika w obszarze wypełnienia. Przykładowe zależności obciążenia krytycznego  $p_{p,cr}$  od położenia pojedynczego wgniecenia w wyniku działania podciśnienia w zakresie  $L_1/L = 0,30$ , gdzie  $L_1$  – obszar wypełnienia, a  $L$  – wysokość silosu, przedstawiono na rys. 2. Wybrane wyniki obliczeń dotyczące wgłębienia umieszczonych w górnej połowie silosu przedstawiono w tabl. 1 i na rys. 3. W tablicy 2 porównano wartość ciśnienia krytycznego w przypadku wgłębienia położonego na wysokości 22,5 m z wynikiem uzyskanym w przypadku powłoki idealnej.

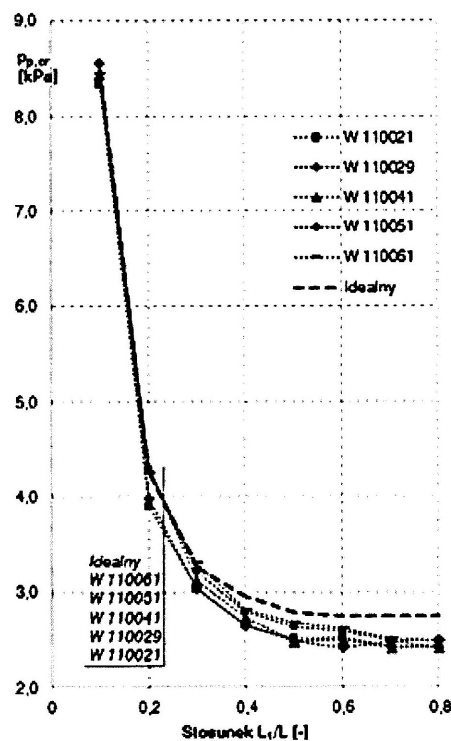


Rys. 1. Schemat geometrii silosu (a) oraz umiejscowienie wstępnych imperfekcji na wysokości płaszcza w postaci pojedynczych eliptycznych wgłębień (b)

Przy takim położeniu pojedynczej imperfekcji oraz na poziomie wypełnienia zbiornika do 7,5 m od górnej krawędzi silosu uzyskano najmniejszą wartość obciążenia krytycznego  $p_{p,cr} = 2,435$  kPa. Wynika to z faktu występowania w tym obszarze płaszcza najcieńszych blach oraz nie tak istotnego usztywniającego wpływu dachu silosu, jaki występuje w wyższych sektorach silosu. Przykładowe deformacje przedstawiono na rys. 4.



Rys. 2. Podciśnienie krytyczne modelu idealnego i modelu z pojedynczym wgłębieniem, w zależności od jego usytuowania w przypadku obciążenia przyłożonego na obszarze  $L_1/L = 0,30$



Rys. 3. Podciśnienie krytyczne modelu idealnego i z pojedynczym wgłębieniem w zależności od obszaru działania podciśnienia

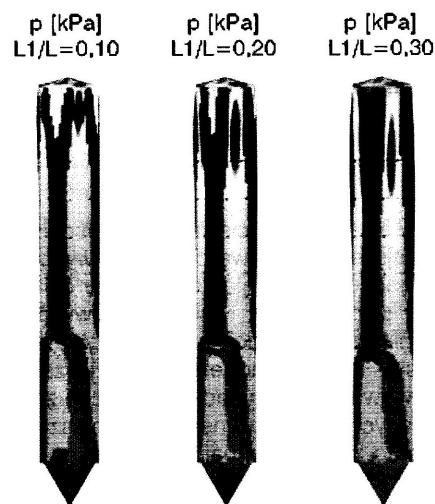
**Tablica 1**  
Podciśnienie krytyczne  $p_{p,cr}$  [kPa] silosu z pojedynczym eliptycznym wgłębieniem  $W$  (rys. 1b) w zależności od obszaru działania obciążenia  $L_1/L$

| $L_1/L$ | W 110021 | W 110029 | W 110041 | W 110051 | W 110061 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,10    | 8,336    | 8,550    | 8,443    | 8,550    | 8,443    |
| 0,20    | 3,899    | 3,980    | 4,290    | 4,290    | 4,255    |
| 0,30    | 3,040    | 3,040    | 3,115    | 3,222    | 3,293    |
| 0,40    | 2,645    | 2,645    | 2,728    | 2,787    | 2,815    |
| 0,50    | 2,518    | 2,483    | 2,483    | 2,637    | 2,680    |
| 0,60    | 2,530    | 2,411    | 2,495    | 2,601    | 2,625    |
| 0,70    | 2,435    | 2,483    | 2,411    | 2,483    | 2,518    |
| 0,80    | 2,435    | 2,411    | 2,411    | 2,495    | 2,483    |

**Tablica 2**  
Podciśnienia krytyczne silosu z pojedynczym eliptycznym wgłębieniem na wysokości 22,5 m i różnym poziomie wypełnienia

| $L_1/L$ | Model idealny $p_{p,cr}$ [kPa] | Model z wgłębieniem W110021 $p_{p,cr}$ kPa | Różnica kPa | Różnica % |
|---------|--------------------------------|--|-------------|-----------|
| 0,10    | 8,550                          | 8,336                                      | 0,214       | 2,50      |
| 0,20    | 4,290                          | 3,899                                      | 0,391       | 9,11      |
| 0,30    | 3,258                          | 3,040                                      | 0,218       | 6,69      |
| 0,40    | 2,961                          | 2,645                                      | 0,316       | 10,67     |
| 0,50    | 2,791                          | 2,518                                      | 0,273       | 9,78      |
| 0,60    | 2,756                          | 2,530                                      | 0,226       | 8,20      |
| 0,70    | 2,756                          | 2,435                                      | 0,321       | 11,65     |
| 0,80    | 2,756                          | 2,435                                      | 0,321       | 11,65     |

odwzorowanie rzeczywistych wstępnych imperfekcji silosu [3]. Jest to najbardziej realistyczny model obliczeniowy, umożliwiający nie tylko określenie obciążenia niszczącego, ale także oszacowanie prawdopodobieństwa jego wystąpienia [1]. Jednak tego rodzaju odwzorowanie jest możliwe jedynie w przypadku zgromadzenia odpowiedniej bazy danych pomierzonych imperfekcji (takie dane można znaleźć np. w pracy [5] dotyczącej zbiorników na paliwa płynne). Jeżeli brakuje kompleksowego opisu rzeczywistych imperfekcji, przyjmuje się je zazwyczaj jako jedną z postaci drgań własnych. Należy podkreślić, że prawdopodobieństwo wystąpienia tego rodzaju wstępnych niekorzystnych deformacji jest małe i może prowadzić do nieuzasadnionego zaniżenia szacowanej nośności projektowanych konstrukcji. Odrębnym problemem jest przyjęcie odpowiedniej amplitudy deformacji. Możliwa jest także superpozycja dwóch lub nawet kilku postaci drgań własnych bądź form utraty stateczności. W pracy [6] wykazano, że tego rodzaju złożenie kilku postaci może prowadzić do najmniejkorzystniejszego obciążenia niszczącego. Dodatkowo za pomocą tej metody można przeprowadzić analizę wrażliwości konstrukcji na zakres i formę imperfekcji wstępnych.

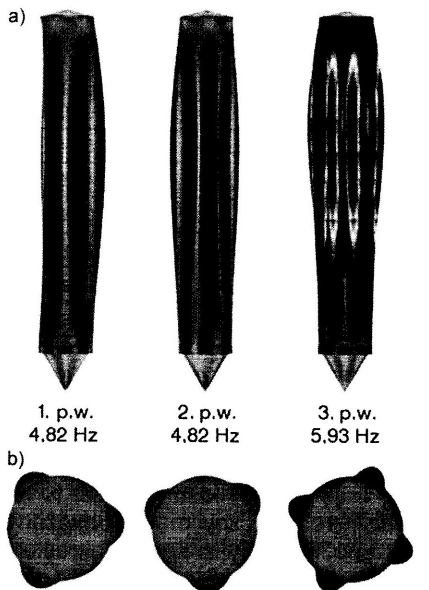


Rys. 4. Deformacja płaszcza silosu odpowiadająca wartości podciśnienia krytycznego w przypadku obszaru działania obciążenia  $L_1/L = 0,10$ ,  $L_1/L = 0,20$  oraz  $L_1/L = 0,30$

#### Deformacja całego płaszcza silosu

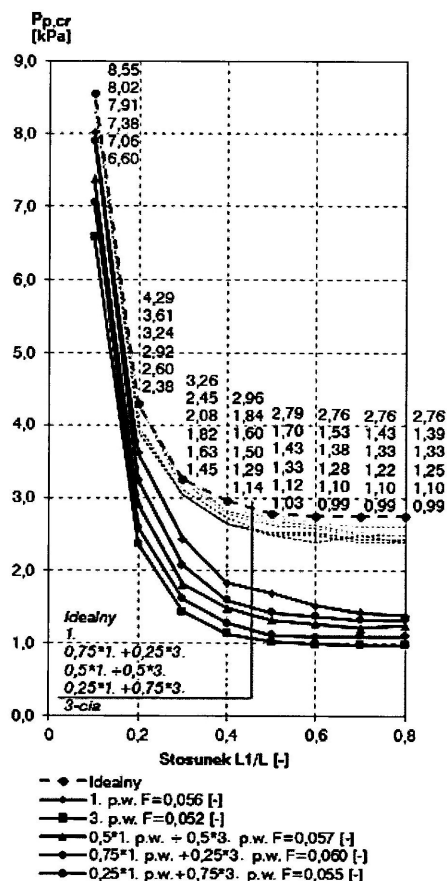
Kolejnym etapem analizy było zbadanie wpływu deformacji całego płaszcza zbiornika. W artykule [2] wykonano obliczenia, przyjąwszy odchyłki opisane polami losowymi, które umożliwiają

W artykule przedstawiono obliczenia wykonane dla silosów z imperfekcjami geometrycznymi odpowiadającymi pierwszej i trzeciej postaci drgań własnych oraz superpozycji obu tych postaci. Postać drugą pominięto, gdyż odpowiadająca jej częstotliwość drgań własnych ma taką samą wartość, jak pierwsza (4,82 Hz), a postaci obu tych drgań są podobne (rys. 5). W obliczeniach przyjęto wartości amplitud imperfekcji podobne jak w przypadku analizy pojedynczego wgłębienia. Ich zakres, a także mnożniki stosowane w przypadku superpozycji pierwszej i trzeciej postaci drgań przedstawiono w tabl. 3. Wyniki wykonanych obliczeń przedstawiono na rys. 6.



Rys. 5. Deformacja płaszcza silosu odpowiadająca 1., 2. oraz 3. postaci drgań własnych: a) widok z boku, b) widok z góry

Rys. 6. Podciśnienie krytyczne modeli idealnego i z deformacjami opisanymi postaciami drgań własnych oraz ich superpozycji w zależności od obszaru  $L_1/L$  działania obciążenia p



Tablica 3

Amplitudy maksymalnych imperfekcji w przypadku różnych wariantów deformacji

| Deformacja                  | Mnożnik $F$ | Max $u_x$ , m | Max $u_y$ , m | Min $u_x$ , m | Min $u_y$ , m |
|-----------------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1. postać drgań własnych    | 0,056       | 0,050         | 0,045         | -0,029        | -0,041        |
| 3. postać drgań własnych    | 0,052       | 0,050         | 0,050         | -0,050        | -0,050        |
| 0,5*1. p.w. + 0,5*3. p.w.   | 0,057       | 0,046         | 0,050         | -0,021        | -0,039        |
| 0,75*1. p.w. + 0,25*3. p.w. | 0,060       | 0,048         | 0,050         | -0,022        | -0,037        |
| 0,25*1. p.w. + 0,75*3. p.w. | 0,055       | 0,048         | 0,050         | -0,034        | -0,044        |

## Wnioski

W artykule analizowano wpływ nieidealnej geometrii na pracę konstrukcji. Imperfekcje geometryczne generowano, określając ich maksymalną amplitudę, zasięg na powierzchni silosu oraz prawdopodobny rozkład. Wykazano, że wyniki obliczeń silosu o idealnej geometrii zazwyczaj nie odwzorowują stanu rzeczywistego. Wykonano kompleksową parametryczną analizę nośności granicznej silosów poddanych podciśnieniu, a w artykule [2] – także obciążeniu wiatrem. Obliczenia dotyczyły zbiorników z wypełnieniem i bez wypełnienia.

W przypadku analizy wpływu pojedynczego wgłębienia wykazano, że utrata stateczności powłoki przy działaniu lokalnego podciśnienia następuje przy większych ściskających naprężeniach obwodowych niż w przypadku działania tego podciśnienia na całej wysokości płaszcza. Zaobserwowano również wyraźne zwiększenie nośności granicznej powłoki

przy działaniu podciśnienia na wysokości mniejszej niż połowa całkowitej wysokości silosu. Bez względu na obszar działania podciśnienia, zawsze największe zmniejszenie podciśnienia krytycznego w stosunku do modelu idealnego zaobserwowano w przypadku wgłębień znajdujących się w górnej strefie płaszcza. Jest to związane z najmniejszymi grubościami blach zbiornika w tym obszarze. Należy podkreślić, że istnieją takie kombinacje parametrów wgłębienia i obszaru działania podciśnienia wewnętrznego, przy których obciążenie krytyczne przyjmuje wartość większą niż w modelu idealnym. W przypadku wgłębień znajdujących się poniżej połowy wysokości płaszcza zaobserwowane zmiany obciążenia krytycznego w stosunku do modelu idealnego są zdecydowanie mniejsze niż w pozostałych przypadkach.

Obciążenia krytyczne modeli silosów z imperfekcjami przyjętymi na podstawie postaci drgań własnych są zdecydowa-

nie mniejsze niż w przypadku konstrukcji idealnej. Także obciążenia krytyczne silosów z imperfekcjami w postaci pojedynczych eliptycznych wgłębien dopuszczonych przez normy są większe niż uzyskane w modelach z deformacją płaszcza według postaci drgań własnych. Należy jednak podkreślić, że bardziej realistyczne losowe pola imperfekcji, opisane za pomocą jednorodnej funkcji korelacyjnej, mają podobny wpływ na wartości obciążeń krytycznych [2]. Podciśnienie  $p_{cr}$  jakie jest w stanie przenieść silos, przy tak określonych wstępnych odchyłkach wyniosło 2,282 kPa [2]. Nieznacznie większe wartości podciśnienia uzyskano w przypadku pola imperfekcji opisanego za pomocą niejednorodnej funkcji korelacyjnej. W obliczeniach inżynierskich jest możliwe wykorzystanie losowych pól imperfekcji wygenerowanych na bazie dostępnych danych o odchyłkach geometrii silosów. Tego rodzaju obliczenia umożliwiają uzyskanie realistycznych wartości obciążeń granicznych, a więc zwiększenie niezawodności projektowanej konstrukcji.

★ ★ ★

Praca została wykonana w ramach grantu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr UMO-2011/03/B/ST8/06500.

## PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Bielewicz E., Walukiewicz H., Górski J.: Symulacje komputerowe w mechanice konstrukcji i w zagadnieniach środowiska. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 5/1995.
- [2] Gołota M., Winkelmann K., Górski J., Mikulski T.: Wpływ wstępnych imperfekcji geometrycznych na nośność silosu obciążonego podciśnieniem i wiatrem. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 2/2011.
- [3] Górski J., Mikulski T.: Obliczenia numeryczne stalowych zbiorników walcowych z imperfekcjami geometrycznymi. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 9/2006.
- [4] Gołota E.: Nośność graniczna nieuźebrowanych cylindrycznych płaszczy silosów stalowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [5] Kowalski D.: Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczy stalowego zbiornika o osi pionowej. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, 2004.
- [6] Lindgaard E., Lund E., Rasmussen K.: Non-linear buckling optimization of composite structures considering “worst” shape imperfection. “International Journal of Solids and Structures”, 2010, 47.
- [7] PN-B-03200:1990 Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [8] PN-B-03202:1996 Konstrukcje stalowe – Silosy na materiały sypkie – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [9] PN-EN 1993-1-6:2009. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1.6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
- [10] SOFISTiK AG for Windows. Structural Analysis Programs Version 23. Oberschleissheim. Niemcy 2007.
- [11] Ziółko J.: Zbiorniki metalowe na ciecze i gazy. Arkady, Warszawa 1986.