

# INŻYNIERIA BUDOWNICTWO



**Polski Związek Inżynierów  
i Techników Budownictwa  
Oddział w Gdańsku  
80-840 Gdańsk  
ul. Świętojańska 43/44**

Gdańsk. Fot. Andrzej Jamiołkowski



## Analiza nośności wybozeniowej cylindrycznego silosu z blachy falistej wzmocnionego słupami

Metalowe powłoki cylindryczne stosowane w silosach są narażone na zniszczenie przede wszystkim związane z utratą stateczności od ściskającego obciążenia pionowego wskutek tarcia materiału sypkiego o ściany silosu. Utrata stateczności ma zwykle miejsce przy niesymetrycznym opróżnianiu, które jest nie do uniknięcia z uwagi na niejednorodny charakter materiałów sypkich. W wyniku tego powstaje niesymetryczny rozkład sił ściskających w ścianie silosu oraz niesymetryczny napór poziomy, który powoduje dodatkowo zginanie ścian w kierunku obwodowym. Nośność wybozeniowa silosu zależy od wielu różnych czynników, takich jak: wielkość imperfekcji geometrycznych, materiałowych i obciążeniowych, sposób wykonania połączeń w ścianie, warunki brzegowe na końcach ścian, wartość naporu wewnętrznego oraz sztywność materiału sypkiego [1÷4].

Ściany silosów mogą być wykonane z płaskich blach walcowanych (spawanych, nitowanych lub skręcanych śrubami po obwodzie silosu) bądź z blach falistych usztywnionych słupami o jednakowym rozstawie wokół obwodu silosu (połączonymi śrubami z blachą). Drugie rozwiązanie jest często stosowane ze względu na małą masę konstrukcji i ekonomiczne zużycie stali. W tym przypadku blacha falista przenosi poziome siły rozciągające od poziomego naporu materiału sypkiego na ściany silosu, a słupy – pionowe siły ściskające od tarcia tego materiału o ściany. W Eurokodzie 3 [5] podano uproszczoną zależność do wyznaczenia nośności wybozeniowej słupów silosu, która jednak nie uwzględnia rzeczywistej przestrzennej pracy całej konstrukcji.

Celem artykułu jest przedstawienie wyników analizy stateczności przestrzennego silosu z falistej blachy ze sfałdowaniem w kierunku obwodowym i wzmocnionego słupami oraz porównanie obliczonej nośności wybozeniowej z wynikami według Eurokodu 3 [5]. Wstępnie przeanalizowano stateczność pojedynczego słupa na podłożu sprężystym, który symulował blachę falistą. Następnie wykonano liniową analizę wybozeniową i nieliniową analizę statyczną uwzględniającą nieliniowość geometryczną i materiałową silosu bez imperfekcji oraz silosu z różnymi imperfekcjami geometrycznymi i obciążeniowymi w przypadku naporu materiału sypkiego według Eurokodu 1 [6]. W obliczeniach wykorzystano program MES Abaqus [7]. W przeciwieństwie do licznych analiz stateczności silosów z izotropowych blach walcowanych [4, 8÷11], obszerne studia numeryczne stateczności silosów z blach falistych ze słupami nie zostały jeszcze wykonane.

### Konstrukcja silosu

Analizowano rzeczywisty pojedynczy silos cylindryczny wchodzący w skład zespołu silosów (rys. 1). Wysokość silosu  $H = 21,48$  m, a jego średnica  $D = 5,35$  m. Powierzchnia silosu była równa  $22,48$  m<sup>2</sup>, a obwód  $16,81$  m. Płaszcz silosu wykonano z 24 pierścieni sfałdowanych w kierunku poziomym (144 blach o wymiarach  $890 \times 2940 \times 0,75$  mm). Silos wzmocniono 18 pionowymi słupami posadowionymi na płycie fundamentowej o rozstawie wzdłuż obwodu równym  $0,933$  m i przekroju cienkościennej otwartej, skokowo zmiennym na wysokości.

Słupy połączone z płaszczem silosu za pomocą śrub. Wysokość przekroju blachy falistej wynosiła  $18$  mm, a długość fali  $76$  mm. Opróżnianie silosu odbywało się przez lej stożkowy wysokości  $2,25$  m i nachyleniu do poziomu  $40^\circ$ , oparty na wewnętrznych słupach i oddzielony od płaszcza silosu. Dach konstrukcji wykonano z blachy pod kątem  $25^\circ$  do poziomu, usztywnionej dodatkowo 24 promienistymi belkami stalowymi. Silos służył do magazynowania pszenicy i został zaprojektowany na niesymetryczne napełnianie i opróżnianie w przepływie kominowym z maksymalną prędkością  $60$  m<sup>3</sup>/h. Po wykonaniu podobnego silosu z 14 słupami ( $H = 15,1$  m,  $D = 12,5$  m) pomierzono geodezyjnie niedokładności montażu. Przemieszczenia poziome na szczycie słupów wynosiły w kierunku poziomym na zewnątrz silosu  $0 \div 6$  cm i do wewnątrz  $0 \div 3$  cm.

Obciążenia silosu od materiału sypkiego wyznaczono według Eurokodu 1 [6]. W przypadku osiowo symetrycznego opróżniania maksymalny poziomy napór na ściany silosu  $p_h = 29$  kPa, a maksymalne obciążenie styczne wzdłuż ściany  $p_w = 13$  kPa. Po uwzględnieniu możliwej niesymetrii wypływu materiału sypkiego, obciążenia ścian silosu zwiększyły się do  $p_h = 33$  kPa i  $p_w = 17$  kPa [6]. Maksymalne charakterystyczne poziome naprężenia rozciągające w płaszczu silosu wynosiły  $110$  MPa i były znacznie mniejsze od naprężeń dopuszczalnych w stali, równych  $280$  MPa. Charakterystyczna nośność wybozeniowa według Eurokodu 3 [5] była przekroczone o  $15\%$  w jednym z przekrojów poprzecznych słupów przy osiowo symetrycznym opróżnianiu, natomiast przy niesymetrycznym



Rys. 1. Bateria silosów cylindrycznych

opróżnianiu była przekroczona w dwóch profilach słupów o 50%. Wyboczenie wystąpiło przy obciążeniu charakterystycznym ścian  $p_w = 11,5$  kPa (tj.  $p_w \approx 0,88 \cdot 13$  kPa przy wypływie osiowo symetrycznym lub  $p_w \approx 0,67 \cdot 17$  kPa przy wypływie niesymetrycznym).

### Nośność wyboczeniowa słupa według Eurokodu 3 [5]

Nośność charakterystyczna na wyboczenie pojedynczego pionowego słupa z poszyciem z blachy falistej (usztywniającym słup w kierunku prostopadłym do jego wysokości) jest określona wzorem [5]

$$N = 2\sqrt{EJK}, \quad (1)$$

gdzie  $EJ$  jest sztywnością zgięciową słupa w płaszczyźnie prostopadłej do ściany silosu i  $K$  sztywnością zgięciową blachy rozpiętej między słupami.

Sztywność blachy można wyznaczać z zależności [5]

$$K = k_s \frac{D_y}{d_s^3}, \quad (2)$$

gdzie  $d_s$  – rozstaw słupów, a współczynnik  $k_s = 6$ .

Sztywność na zginanie blachy faldowej

$$D_y = 0,13Etd^2, \quad (3)$$

gdzie  $E$  – moduł sprężystości blachy,  $t$  – grubość blachy falistej,  $d$  – wysokość blachy falistej.

Równania (1) i (2) zostały wyprowadzone przy założeniach:

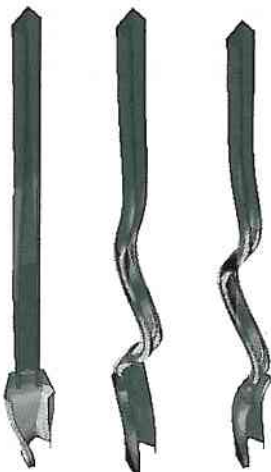
- wyboczenie słupa występuje tylko w płaszczyźnie prostopadłej do ściany silosu (blacha falista usztywnia wystarczająco słup w płaszczyźnie stycznej do ściany);
- liczba półfal wyboczeniowych wzdłuż obwodu silosu jest równa połowie liczby słupów (przy liczbie słupów podzielnej przez 4);
- słup jest tylko obciążony siłą pionową przyłożoną na jego końcu (nie uwzględnia się poziomego obciążenia ścian);
- słup jest oparty na podłożu sprężystym wzdłuż jego wysokości, którego sztywność jest równa zgięciowej sztywności blachy falistej;
- słup jest podparty przegubowo na obu końcach.

Równania (1) ÷ (3) mogą być wyprowadzone w sposób analityczny.

### Stateczność słupa opartego na podłożu sprężystym

Wstępnie wykonano analizę stateczności MES pojedynczego słupa na podłożu sprężystym wzdłuż jego wysokości (modelującym blachę falistą), obciążonego zmiennym wzdłuż wysokości obciążeniem pionowym wynikającym z tarcia materia-

łu sypkiego o ścianę silosu i obciążeniem poziomym od naporu materiału na ścianę przy osiowo symetrycznym opróżnianiu silosu, które korzystnie wpływa na nośność krytyczną słupa. Sztywność podłoża sprężystego określono na podstawie równania (2). Pojedynczy słup modelowano za pomocą elementów powłokowych. Przyjęto, że dolny koniec słupa jest utwierdzony w fundamencie. Na rysunku 2 pokazano pierwsze trzy postaci wyboczenia



Rys. 2. Trzy pierwsze formy wyboczenia słupa na podłożu sprężystym

słupa otrzymane z liniowej analizy wyboczeniowej (wyniki z geometrycznie nieliniowej analizy statycznej były podobne). Współczynnik obciążenia  $\lambda$ , zdefiniowany jako stosunek obciążenia wyboczeniowego do obciążenia przy osiowo symetrycznym opróżnianiu silosu, był równy kolejno 0,8; 1,4 i 1,5 w przypadku pierwszej, drugiej i trzeciej postaci wyboczenia słupa. Pierwsza postać wyboczenia słupa odpowiada jego skręceniu. W rzeczywistości ta forma wyboczenia jest blokowana przez blachę falistą, która oprócz redukcji przemieszczeń w kierunku normalnym zmniejsza również skręcenie słupa. Sztywność podłoża sprężystego  $K_\theta$  ograniczającego skręcenie słupa może być wyznaczona z zależności

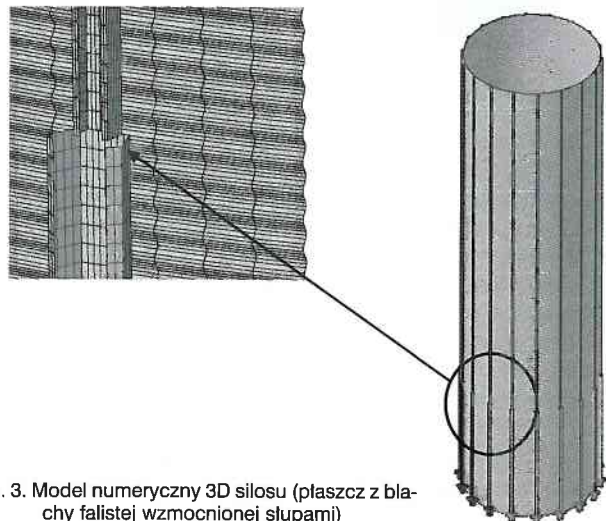
$$K_\theta = \frac{M}{\Theta} = \frac{6(EJ)_{bf}}{l} = \frac{6(EJ)_{bf}}{2d_s}, \quad (4)$$

Zależność na nośność wyboczeniową słupa [równanie (1)] odpowiada drugiej postaci wyboczenia słupa obciążonego tylko składową styczną obciążenia wskutek tarcia materiału sypkiego o ścianę silosu. Z przeprowadzonej analizy MES słupa wynika, że ulega on wyboczeniu przy maksymalnych obciążeniach stycznych na ścianie silosu  $p_w = 18,6$  kPa. Nośność wyboczeniowa słupa wyznaczona według Eurokodu [5] ma więc co najmniej 60-procentowy zapas bezpieczeństwa. Efekt imperfekcji geometrycznych okazał się pomijalny w obliczeniach.

### Stateczność silosu

Wykonano obliczenia MES całego silosu za pomocą programu Abaqus [7], w którym uwzględniono blachę falistą oraz słupy o skokowo zmiennym przekroju (rys. 3). W analizie pominięto lej stożkowy i dach. Płaszcz był sztywno mocowany do słupów w górnych częściach fal blachy w stałym rozstawie 0,076 m (samych śrub nie modelowano). Zastosowano cztero-węzłowe elementy powłokowe ze zredukowanym całkowaniem (przyjęto około 700 000 elementów skończonych). Do modelowania zakrzywienia blachy falistej użyto minimum 5 elementów skończonych, których wymiary wynosiły  $7 \times 130$  mm<sup>2</sup> (przyjęto 126 elementów wzdłuż obwodu silosu). Słupy modelowano za pomocą elementów skończonych o wymiarach  $10 \times 36$  mm<sup>2</sup> (przyjęto 265 elementów wzdłuż wysokości słupa). Założono, że słupy są utwierdzone w płycie fundamentowej. Na górnym końcu słupów rozpatrzono całkowitą blokadę przemieszczeń, blokadę przemieszczeń w kierunku radialnym i stycznym lub bez blokady przemieszczeń (okazało się, że wpływ warunków brzegowych na górnym końcu słupa na wyniki był pomijalny). Przeprowadzono dwie różne analizy stateczności silosu:

LBA – liniowa analiza stateczności silosu bez imperfekcji i z imperfekcjami, w której obciążenie krytyczne otrzymano z rozwiązania problemu własnego;



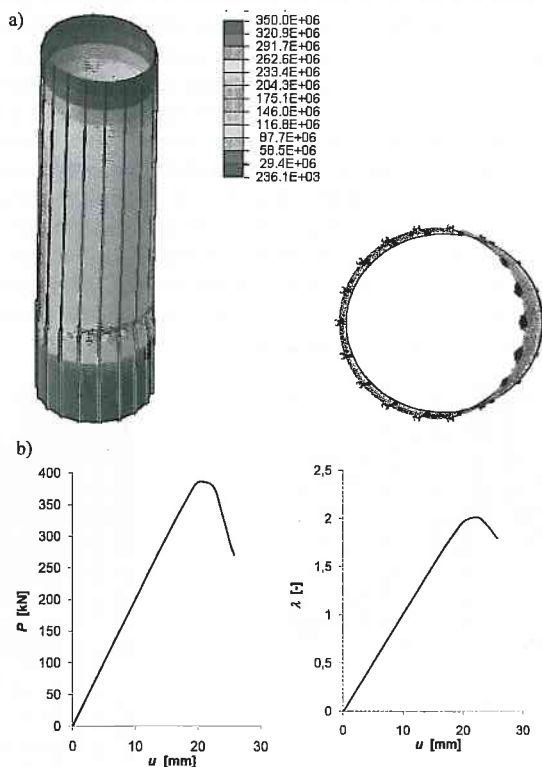
Rys. 3. Model numeryczny 3D silosu (płaszcz z blachy falistej wzmocnionej słupami)

GMNA – geometrycznie i materiałowo nieliniowa analiza statyczna silosu z imperfekcjami (poprzez wyznaczanie ścieżki równowagi siła – przemieszczenie).

Przyjęto w przypadku stali: moduł sprężystości  $E = 210 \text{ GPa}$ , współczynnik Poissona  $\nu = 0,3$  i granica plastyczności  $f_y = 350 \text{ MPa}$ . W liniowej analizie stateczności przyjęto sprężysty model materiału, natomiast w nieliniowej analizie statycznej – model sprężysto-idealnie plastyczny. W analizie nieliniowej do wyznaczenia zależności obciążenia od przemieszczeń konstrukcji zastosowano metodę *Riksa* [7]. Minimalny przyrost w sterowaniu parametrem długości łuku był równy  $1 \cdot 10^{-5}$ . Uwzględniono w obliczeniach osiowo symetryczne obciążenie styczne i normalne od materiału sypkiego (korzystne w przypadku nośności wyboczeniowej konstrukcji) oraz lokalne obciążenie poziome wynikające z nierównomiernego przepływu materiału sypkiego tzw. „patch load” [6] (niekorzystne w przypadku nośności wyboczeniowej konstrukcji).

• **Silos bez imperfekcji.** W przypadku liniowej analizy wyboczeniowej oraz osiowo symetrycznego obciążenia stycznego i normalnego, a także lokalnego obciążenia poziomego [6], współczynnik obciążenia wyboczeniowego  $\lambda$  był równy 5, czyli obciążenie w chwili wyboczenia było pięć razy większe niż przy osiowo symetrycznym obciążeniu ścian silosu według Eurokodu 1 [6] ( $p_w = 5 \cdot 13 \text{ kPa}$ ,  $p_n = 5 \cdot 29 \text{ kPa}$ ). W momencie wyboczenia wystąpiło lokalne wyboczenie ścianek słupów.

Wyniki nieliniowej analizy statycznej (GMNA) pokazano na rys. 4 (w przypadku osiowo symetrycznego obciążenia stycznego i normalnego oraz lokalnego obciążenia poziomego [6]). Współczynnik obciążenia wyboczeniowego  $\lambda$  był równy 2, czyli obciążenie w stanie granicznym było dwa razy większe niż osiowo symetryczne obciążenie ścian silosu [6]. Mechanizm zniszczenia polegał na osiągnięciu naprężeń plastycznych w połączeniu pomiędzy dwoma różnymi profilami słupa. Zależność współczynnika obciążenia w funkcji przemieszczenia pio-



Rys. 4. Nieliniowa analiza statyczna MES silosu cylindrycznego bez imperfekcji (analiza GMNA): a) deformacja w stanie granicznym (z naprężeniami według von Misesa [Pa]), b) zależność siły pionowej  $P$  od pionowego przemieszczenia wierzchołka słupa  $u$  lub współczynnika obciążenia  $\lambda$  od przemieszczenia  $u$

nowego wierzchołka słupa była liniowa aż do osiągnięcia stanu granicznego, później współczynnik obciążenia uległ znacznej redukcji.

• **Silos z imperfekcjami geometrycznymi.** W przeprowadzonej analizie przyjęto cztery różne imperfekcje geometryczne:

1) w formie pierwszej postaci wyboczenia silosu bez imperfekcji, która została wyznaczona w przypadku silosu o zwiększonej 10 razy grubości blachy falistej (w celu wyeliminowania lokalnych postaci wyboczenia); postać wyboczenia odpowiadała 18 półfalom wyboczeniowym wzdłuż obwodu silosu; liczba półfal wyboczenia była więc dwa razy większa niż ta wynikająca z równań (1) i (2);

2) deformacja silosu miała kształt owalny;

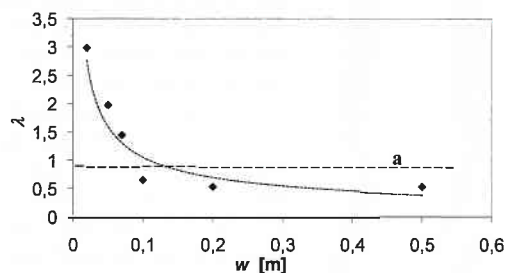
3) deformacja silosu była wywołana poziomym przemieszczeniem punktu w połowie wysokości jednego słupa skierowanym do środka silosu;

4) w formie pierwszych postaci poziomych słupów zgodnie z pomiarami geodezyjnymi.

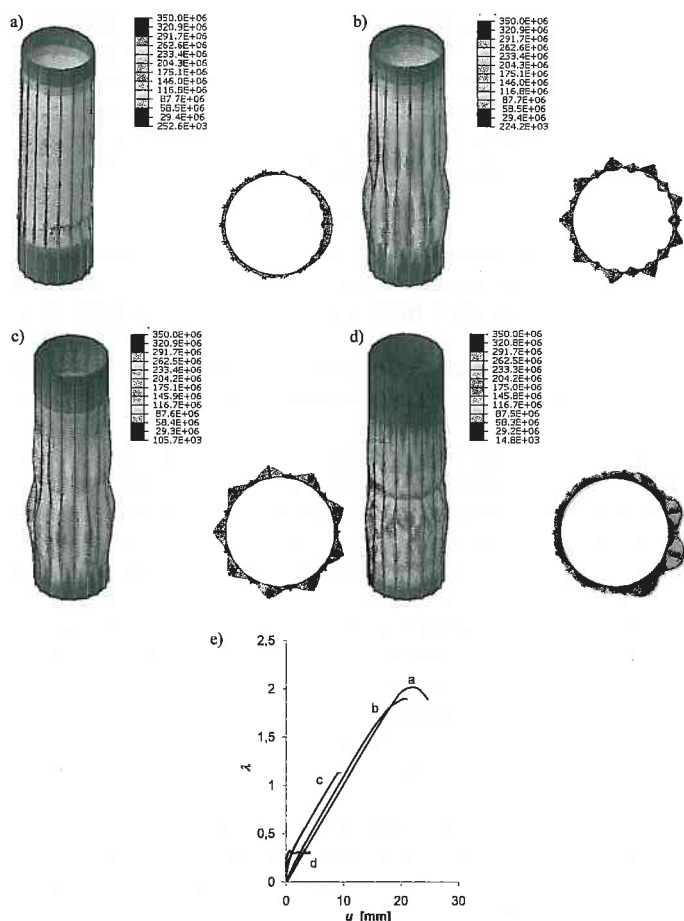
We wszystkich przypadkach analizowano silos z obciążeniem osiowo symetrycznym stycznym i normalnym i lokalnym obciążeniem normalnym od materiału sypkiego [6].

■ Zmiany współczynnika obciążenia wyboczeniowego wraz ze zwiększeniem amplitudy przyjętej imperfekcji geometrycznej w [(w przypadku imperfekcji „1”) przedstawiono na rys. 5 (według liniowej analizy wyboczeniowej LBA). Współczynnik obciążenia wyboczeniowego  $\lambda$  zmienia się od 0,44 ( $w = 1,0 \text{ m}$ ) do 4,35 ( $w = 0,005 \text{ m}$ ). W przypadku małych amplitud imperfekcji  $w < 7 \text{ cm}$  występuje lokalna utrata stateczności (wyboczenie ścianek słupów), a przy większych amplitudach imperfekcji ( $w \geq 7 \text{ cm}$ ) ma miejsce globalna postać wyboczenia silosu, polegająca na równoczesnym wyboczeniu słupów i płaszczu. Przy amplitudzie imperfekcji  $w = 13 \text{ cm}$  współczynnik obciążenia przy wyboczeniu odpowiada dopuszczalnemu obciążeniu wyznaczonemu z równania (1) [5]. Wyniki nieliniowej analizy statycznej (GMNA) pokazano na rys. 6 (deformacje odpowiadające obciążeniu granicznemu w przypadku różnych amplitud  $w$  i zależność obciążenie – przemieszczenie górnego końca słupa). Współczynnik obciążenia  $\lambda$  zmienia się od 0,32 ( $w = 0,2 \text{ m}$ ) do 2,02 ( $w = 0,005 \text{ m}$ ). Współczynnik ten może być mniejszy ( $w = 0,005 \text{ m}$ ,  $w = 0,05 \text{ m}$  oraz  $w = 0,2 \text{ m}$ ) lub większy ( $w = 0,1 \text{ m}$ ) niż obliczony w liniowej analizie wyboczeniowej. Z zależności obciążenie – przemieszczenie wynika, że konstrukcja wykazuje zachowanie liniowo-sprężyste do osiągnięcia obciążenia granicznego, a potem osłabia się zależnie od amplitudy imperfekcji (osłabienie jest mniejsze w przypadku większych amplitud).

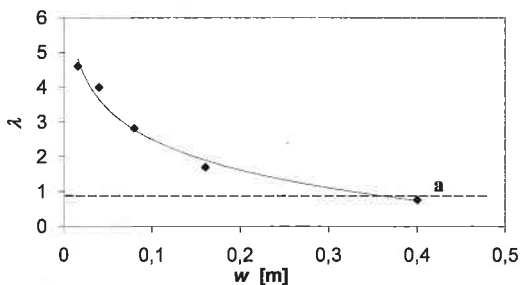
■ Wyniki analizy LBA w przypadku imperfekcji geometrycznej „2” pokazano na rys. 7. W przypadku wszystkich analizowanych amplitud imperfekcji typu „2” wyznaczone postacie wyboczeniowe pokazują lokalną utratę stateczności swobodnych ścianek słupów. Efekt imperfekcji geometrycznych nie wpływa w istotny sposób na nośność wyboczeniową silosu, gdyż do-



Rys. 5. Współczynnik obciążenia wyboczeniowego  $\lambda$  w zależności od poziomej amplitudy imperfekcji geometrycznej  $w$  w przypadku imperfekcji typu „1” (analiza LBA) (a – współczynnik nośności wyboczeniowej według Eurokodu 3 [5])



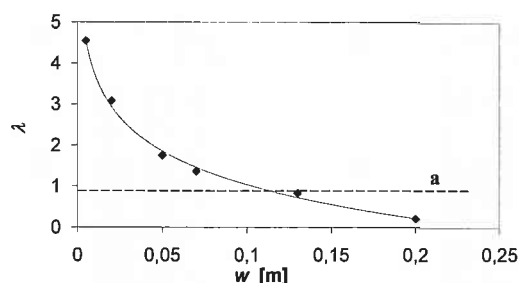
Rys. 6. Nieliniowa analiza statyczna MES silosu cylindrycznego: deformacja w stanie granicznym (z naprężeniami von Misesa [Pa] w przypadku różnej maksymalnej poziomej amplitudy imperfekcji geometrycznej w (analiza GMNA, imperfekcja typu „1”): a)  $w = 0,005$  m, b)  $w = 0,05$  m, c)  $w = 0,1$  m, d)  $w = 0,2$  m, e) zależność współczynnika obciążenia  $\lambda$  od pionowego przemieszczenia wierzchołka słupa  $u$



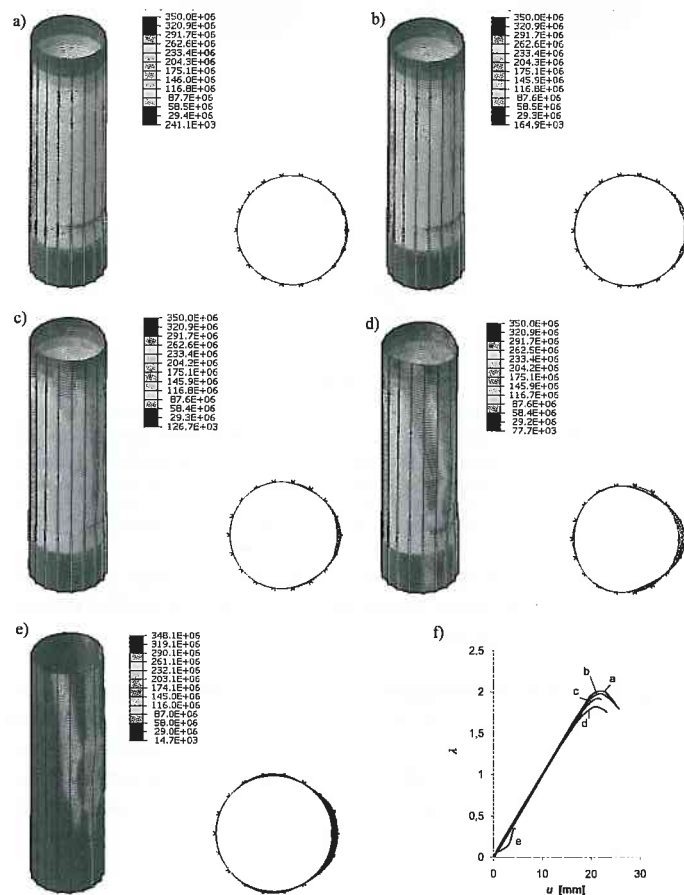
Rys. 7. Współczynnik obciążenia wybocheniowego  $\lambda$  w zależności od poziomej amplitudy imperfekcji geometrycznej w dla imperfekcji typu „2” (analiza LBA) (a – współczynnik nośności wybocheniowej według Eurokodu 3 [5])

piero przy amplitudzie imperfekcji  $w = 35$  cm obciążenie wybocheniowe jest równe nośności wybocheniowej według równania (1) [5].

Wyniki analizy LBA w przypadku imperfekcji geometrycznej „3” pokazano na rys. 8. Przy małych amplitudach imperfekcji geometrycznych  $w$  ( $w < 0,5 \div 7$  cm) stwierdzono lokalną utratę stateczności polegającą na wyboczeniu ścianek słupów. W przypadku większych wartości  $w$  ( $w \geq 7$  cm) przeważała globalna postać wyboczenia silosu. Przy imperfekcji maksymalnej  $w = 13$  cm współczynnik obciążenia przy wyboczeniu odpowiada dopuszczalnemu obciążeniu wyznaczonemu ze wzoru (1) [5]. Wyniki nieliniowej analizy statycznej pokazano na rys. 9. Współczynnik obciążenia granicznego jest mniejszy niż współczynnik obciążenia krytycznego (z analizy LBA) w przypadku małych imperfekcji geometrycznych ( $w \leq 0,02$ ) i większy niż



Rys. 8. Współczynnik obciążenia wybocheniowego  $\lambda$  w zależności od poziomej amplitudy imperfekcji geometrycznej w dla imperfekcji typu „3” (analiza LBA) (a – współczynnik nośności wybocheniowej według Eurokodu 3 [5])

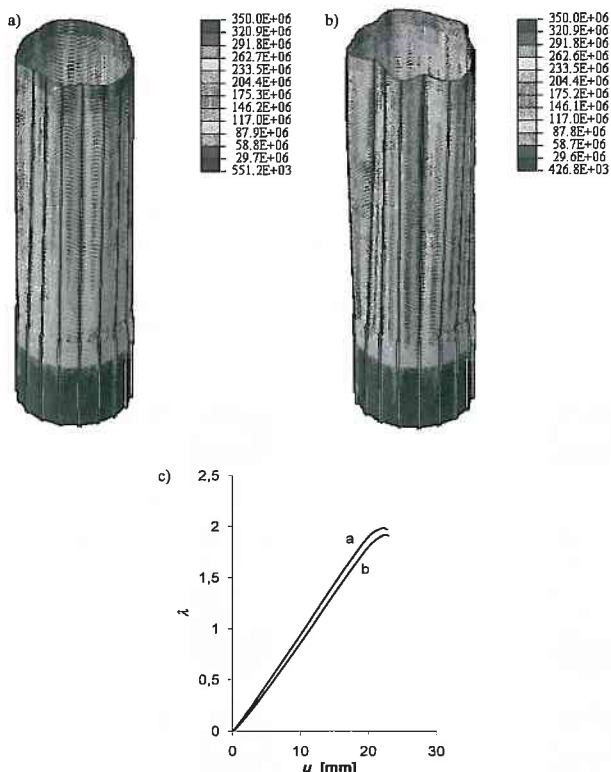


Rys. 9. Wyniki analizy MES: deformacja silosu w stanie granicznym (z naprężeniami von Misesa [Pa] przy różnych wartościach maksymalnej poziomej imperfekcji geometrycznej w dla imperfekcji geometrycznej „3” (analiza GMNA): a)  $w = 0,005$  m, b)  $w = 0,05$  m, c)  $w = 0,1$  m, d)  $w = 0,2$  m, e)  $w = 0,5$  m, f) zależność współczynnika obciążenia  $\lambda$  od pionowego przemieszczenia wierzchołka słupa  $u$

współczynnik obciążenia krytycznego (z analizy LBA) przy większych imperfekcjach ( $w \geq 0,05$ ).

Analizę uwzględniającą imperfekcję geometryczną „4” wykonano, uwzględniając pomierzone geodezyjnie przemieszczenia słupów (przypadek „a”) oraz te same pomierzone przemieszczenia, zwiększone dwukrotnie (przypadek „b”). Obliczone współczynniki obciążenia wybocheniowego (według LBA)  $\lambda$  były równe 2,0 (przypadek „a”) i 1,3 (przypadek „b”), a wyboczenie miało charakter lokalny, polegający na utracie stateczności ścianek słupów. W przypadku nieliniowej analizy statycznej współczynnik obciążenia granicznego  $\lambda$  był równy 2,0 (przypadek „a”) oraz 1,9 (przypadek „b”), a odpowiadające deformacje silosu miały charakter globalny (rys. 10).

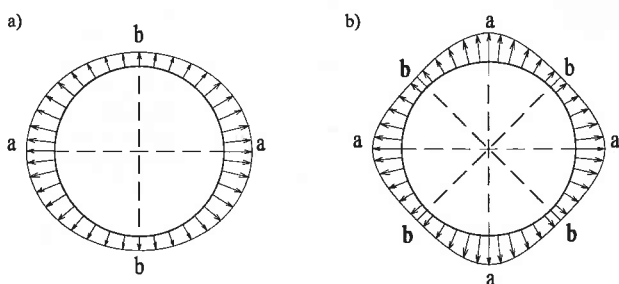
Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że imperfekcje geometryczne zgodne z postacią wyboczenia według liniowej analizy wybocheniowej oraz imperfekcje wywo-



Rys. 10. Wyniki analizy MES: deformacja silosu w stanie granicznym w przypadku imperfekcji geometrycznej „4” (analiza GMNA) (z naprężeniami von Misesa [Pa]): a) przy poziomych przemieszczeniach słupów według pomiarów geodezyjnych, b) przy poziomych przemieszczeniach słupów według pomiarów geodezyjnych zwiększonych dwukrotnie, c) zależność współczynnika obciążenia  $\lambda$  od pionowego przemieszczenia wierzchołka słupa  $u$

lane przemieszczeniem środka wysokości jednego ze słupów w kierunku do wnętrza silosu miały największy wpływ na nośność graniczną silosu.

• **Silos z imperfekcjami obciążeniowymi.** Doświadczenia wykonane w dużych silosach pokazują, że poziomy napór na ściany silosu może różnić się nawet o 30÷40% wzdłuż obwodu [12]. W obliczeniach MES uwzględniono dwa przypadki nierównomiernego rozkładu obciążeń ścian  $p_h$  oraz  $p_w$  wzdłuż obwodu (rys. 11), które różniły się o 50%.



Rys. 11. Nierównomierne obciążenie silosu (normalne i styczne) przyjęte w obliczeniach numerycznych: a) model I, b) model II (a i b oznaczają odpowiednie proporcje obciążenia w stosunku do obciążenia normowego w [%])

W nieliniowej analizie statycznej ze współczynnikami  $a = 100\%$  i  $b = 50\%$  (rys. 12a) w przypadku obciążenia osiowo symetrycznego współczynnik obciążenia  $\lambda = 1,0$ , a maksymalne

poziome przemieszczenie ściany wynosiło 7 cm. Natomiast w przypadku imperfekcji według rys. 11b (ze współczynnikami  $a = 100\%$  i  $b = 50\%$  przy obciążeniu osiowo symetrycznym), współczynnik obciążenia  $\lambda = 2,5$ , a maksymalne poziome przemieszczenie ściany 8 cm. Wpływ nierównomiernych obciążeń wzdłuż obwodu silosu okazał się więc mało istotny.

### Wnioski

Z przeprowadzonej analizy MES stateczności cylindrycznego silosu z blachy falistej wzmocnionego słupami i obciążonego według Eurokodu 1 można wyciągnąć niżej podane wnioski.

Obciążenie krytyczne silosu bez imperfekcji jest 3 razy większe w analizie 3D niż na podstawie wzoru według Eurokodu 3 [5].

Obecność imperfekcji geometrycznych ścian silosu powoduje istotne zmniejszenie nośności wybocheniowej konstrukcji. Efekt ten jest największy w przypadku imperfekcji poziomych w formie postaci wybocheniowych silosu lub imperfekcji wywołanych przemieszczeniem poziomym środka słupa skierowanym do środka silosu. Wpływ nierównomierności obciążenia materiałem sypkim wzdłuż obwodu silosu okazał się nieistotny.

Uwzględnienie nieliniowości materiałowej powoduje znaczną redukcję nośności wybocheniowej słupa.

Relacja pomiędzy współczynnikiem obciążenia wybocheniowego a współczynnikiem obciążenia granicznego silosu zależy od poziomej amplitudy imperfekcji geometrycznych. Jeżeli pozioma amplituda imperfekcji geometrycznych jest ograniczona do około 5 cm, nośność wybocheniowa silosu obliczona w przypadku modelu 3D jest dwukrotnie większa niż wyznaczona według Eurokodu 3 [5]. Gdy maksymalna pozioma amplituda imperfekcji jest równa około 10 cm, wyniki analizy 3D i według Eurokodu 3 [5] są podobne.

### PIŚMIENICTWO

- [1] Fayer N., Otten L.: Handbook of Powder Science and Technology. Chapman and Hall, 1984.
- [2] Rotter J. M.: Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos. Spon Press, 2001.
- [3] Safarian S.S., Harris E.C.: Design and Construction of Silos and Bunkers. Van Nostrand Reinhold Company, 1985.
- [4] Brown C.J., Nielsen J.: Silos: Fundamentals of theory, behavior and design. E and FN Spon, 1998.
- [5] PN-EN 1993-4-1 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, część 4-1: Silosy, 2007.
- [6] PN-EN 1991-4 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje, część 4, Silosy i zbiorniki, 2006.
- [7] Abaqus. Theory Manual, Version 6.8. Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc, 2008.
- [8] Song C.Y., Teng J.G.: Buckling of circular steel silos subjected to code-specified eccentric discharge pressures. „Engineering Structures”, 25, 2003.
- [9] Knebel K., Schweizerhof K.: Buckling of cylindrical shells containing granular solids. „Thin-Walled Structures”, 23, 1995.
- [10] Rotter J.M.: Shell-structures: the new European standard and current research needs. „Thin-Walled Structures”, 31, 2-23, 1998.
- [11] Tejchman J.: The influence of bulk solids on buckling strength of silos. „Powder Handling and Processing”, 16, 4/5, 1-6, 2004.
- [12] Wójcik M., Härtl J., Jin Y., Ooi J.Y., Rotter M., Ding S., Enstad G.G.: Experimental investigation of the flow pattern and wall pressure in a silo with a double cone insert. „Particle & Particle System Characterization”, 24, 4-5, 2007.
- [13] Wójcik M., Tejchman J.: Modeling of shear localization during confined granular flow in silos within non-local hypoplasticity. „Powder Technology”, 192, 3, 2009.

**Jeszcze można zaprenumerować „Inżynierię i Budownictwo”  
na cały rok 2011**