

Nośność wybocheniowa żeber wzmacniających ściany stalowego silosu na zboże

Paweł Błażejowski, Jakub Marcinowski¹

¹ Zakład Konstrukcji Budowlanych, Instytut Budownictwa, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski, e-mail: P.Blazejowski@ib.uz.zgora.pl, J.Marcinowski@ib.uz.zgora.pl

Streszczenie: Siły południkowe w silosie stalowym, którego ściany są wykonane z blachy profilowanej poziomo są przenoszone przez żebra pionowe. Elementy te są zazwyczaj wykonywane z cienkościennych kształtowników zimnogiętych wrażliwych na miejscową utratę stateczności. W pracy przedstawiono numeryczną procedurę oszacowania nośności wybocheniowej rodziny żeber wykonanych z blach o różnej grubości. Uwzględniono imperfekcje w postaci pierwszej formy wybochenia i amplitudach do wartości 4t włącznie. Wyniki porównano z bardzo zachowawczymi wartościami nośności wybocheniowej takich elementów proponowanymi w zapisach normy PN-EN1993-4-1.

Słowa kluczowe: silos stalowy, żebra pionowe, stalowe elementy zimnogięte, nośność wybocheniowa, imperfekcje, procedura numeryczna.

1. Wprowadzenie

Stalowe silosy na zboże na trwałe wpisały się w krajobraz współczesnej wsi i stały się wręcz konieczne w gospodarstwach specjalizujących się w produkcji zbóż. Wobec upowszechnienia tych wcale nie tak prostych obiektów inżynierskich, konstruktorzy prześcigają się w rozwiązaniach minimalizujących ciężar, a tym samym zużycie stali o wysokiej wytrzymałości zabezpieczonej antykorozyjnie w procesie galwanizacji. Minimalizuje się zarówno grubości blach płaszczu (carg) jak i grubości blach, z których są wykonywane zimnogięte przekroje żeber wzmacniających płaszcz z zewnątrz (por. rys. 1). Minimalizacja grubości elementów powinna być poparta szczegółowymi analizami potwierdzającymi poprawność rozwiązań konstrukcyjnych. Dotyczy to w szczególności żeber przenoszących znaczne siły ściskające.



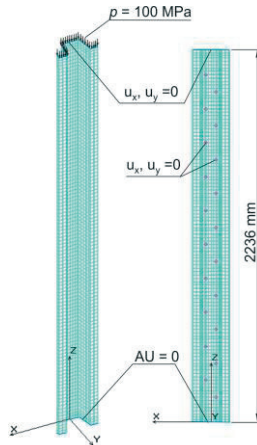
Rys. 1. Stalowe silosy na zboże



Rys. 2. Awaria stalowego silosu na zboże

Przykładowe silosy stalowe na zboże o typowej konstrukcji z blach falistych i filarów zewnętrznych pokazano na rys. 1. Płaszcz silosu jest wykonany z blachy falistej o grubości nie przekraczającej 2 mm. Relatywnie duży współczynnik tarcia materiału sypkiego o taką ścianę i jej mała sztywność południkowa sprawiają, że koniecznym jest wprowadzenie do

konstrukcji dodatkowych żeber przejmujących siły pionowe. Na tych żebrach opierają się zazwyczaj konstrukcje wsporcze galerii zasypowych i konstrukcja dachu silosu. W silosach z dnem płaskim żebra stanowią najbardziej newralgiczny element konstrukcji nośnej silosu. Przekroczenie ich nośności skutkuje katastrofą budowlaną prowadzącą do zniszczenia silosu, a czasami także obiektów sąsiednich, (por. rys. 2).



Rys. 3. Geometria żebra, zastosowana siatka elementów skończonych oraz warunki brzegowe

Częstość awarii silosów sprawiła, że konstrukcje te stały się obiektem badań wielu autorów (por. [1], [2], [3], [4]). Pomocnym narzędziem w projektowaniu silosów jest norma PN-EN 1993-4-1, której zapisy są niestety bardzo konserwatywne. Norma PN-EN 1993-1-6 dopuszcza procedury o charakterze ogólnym wymagające jednak biegłości w numerycznym modelowaniu konstrukcji z opcją uwzględnienia odchyłek geometrycznych (imperfekcji), które w ogólnym przypadku nie są znane.

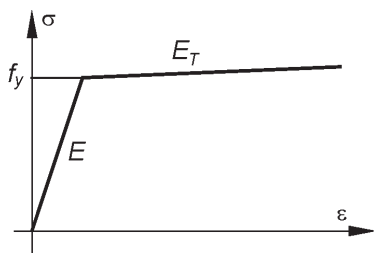
W pracy zaprezentowano sposób oszacowania nośności wybocheniowej żeber zewnętrznych silosu wykorzystując procedurę ogólną rekomendowaną w PN-EN-1993-1-6. Polega ona na wykonaniu analiz numerycznych z grupy GMNIA (geometrycznie i materiałowo nieliniowe analizy uwzględniające imperfekcje geometryczne). W modelowaniu wykorzystano system COSMOS/M ([5], [6]) bazujący na metodzie elementów skończonych. W modelu uwzględniono zjawiska sprężysto-plastycznego wybożenia filarów symulując zniszczenie w zakresie fizycznej i geometrycznej nieliniowości oraz wykorzystując imperfekcje w postaci pierwszych form wybożenia uzyskanych w liniowej analizie stateczności (LBA). Założono przy tym, że amplitudy tych imperfekcji mogą osiągnąć maksymalną wartość czterech grubości blachy, z której został wykonany kształtownik.

W pracy przedstawiono wyniki oszacowania nośności wybocheniowej dla przykładowego kształtu żebra i różnych grubości ścianki. Wyniki te zostały porównane z nośnością obliczeniową otrzymaną na podstawie norm PN-EN-1993-1-1, PN-EN-1993-1-3 oraz PN-EN-1993-4-1.

2. Szczegóły modelu numerycznego

W analizie numerycznej wykorzystano system COSMOS/M bazujący na metodzie elementów skończonych. Zamodelowano wycinek płaszcza silosu z żebrami długości 2,236 m. Powierzchnię środkową żebra podzielono na 2664 czworokątne elementy skończone (5 stopni swobody w węzle w opisie aproksymacji wewnętrznej elementu). Całkowita liczba stopni swobody to 16800. Testy wpływu gęstości siatki na rozwiązanie wykonane wcześniej dla analogicznych analiz wskazują, że taki podział jest w zupełności wystarczający.

Podział żebra na czworokątne elementy skończone (SHELL4T w bibliotece systemu COSMOS/M) pokazano na rys. 3. Na rysunku tym pokazano także punkty mocowania żebra do płaszcza silosu za pomocą śrub.



Rys. 4. Charakterystyka materiałowa materiału żebra

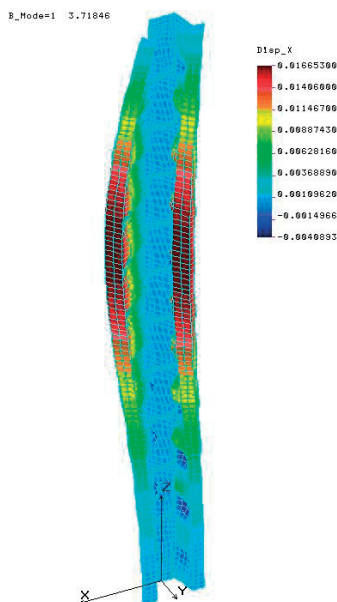
W modelu geometrii otwory na łączniki nie były uwzględniane.

Na rys. 3 przedstawiono także warunki podparcia poszczególnych krawędzi modelowanego żebra. Dolna krawędź żebra była podparta wg schematu AU – wszystkie translacyjne stopnie swobody blokowane. Górna krawędź była podparta analogicznie z tą różnicą że zwolniona była translacja u_z . Żebra są łączone na długości za pomocą blach czołowych i przyjęte warunki podparcia dobrze oddają takie rozwiązanie konstrukcyjne.

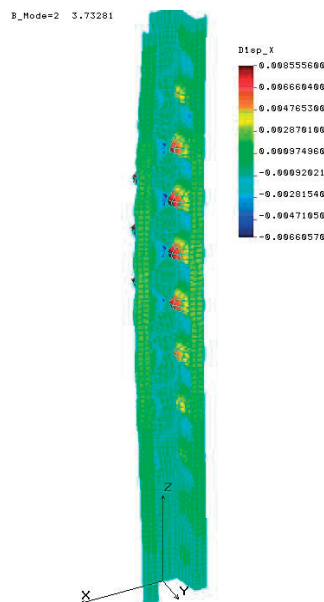
W miejscach występowania łączników trzpieniowych (śrub) przyjęto warunki $u_x = 0$ i $u_y = 0$, umożliwiono zatem ruch pionowy płaszczyzny stycznej do ściany silosu. W napełnionym silosie (w tym stanie siły w żebrach są największe) płaszcz jest silnie naprężony i można go traktować jako podłoże niemal sztywne.

Tak więc można uznać, że przyjęte warunki brzegowe (warunki podparcia) są zbliżone do rzeczywistych warunków pracy tak wydzielonego pionowego żebra silosu.

Obciążona jest górna krawędź żebra ciśnieniem rozłożonym na grubości ścianki prze-



Rys. 5. Pierwsza forma wyboczenia (LBA)



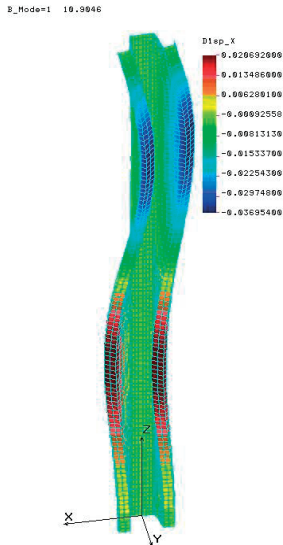
Rys. 6. Druga forma wyboczenia (LBA)

kroju. Wartość tego ciśnienia, traktowanego jako obciążenie odniesienia, była równa $p = 100$ MPa. Było to jedyne obciążenie uwzględnione w analizie; ciężar własny został pominięty.

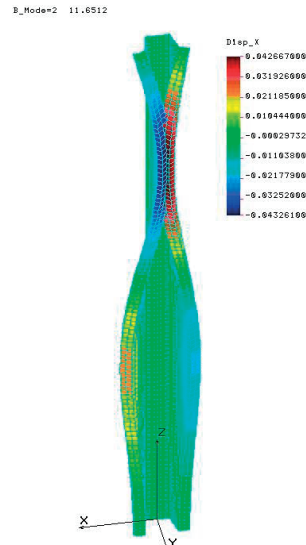
W przeprowadzonej nieliniowej analizie sprężysto-plastycznej uwzględniono biliniowo (por. rys. 4) materiał sprężysto plastyczny, którego parametry przyjęto w sposób następujący: granica plastyczności $R_e = 390$ MPa, moduł Younga $E = 210$ GPa, moduł wzmocnienia $E_T = 21$ MPa oraz współczynnik Poissona $\nu = 0,3$.

W nieliniowych analizach numerycznych zastosowano bądź to sterowanie obciążeniowe, bądź to sterowanie przemieszczeniowe gwarantujące możliwość swobodnej kontynuacji obliczeń także po przekroczeniu ekstremum obciążeniowego. W przypadku sterowania przemieszczeniowego sterowano przemieszczeniem węzła wykazującego

największe wychylenie w przyjętej do obliczeń formie imperfekcji. W każdym kroku przyrostowej analizy sprężysto-plastycznej wyznaczano mnożnik obciążenia do tego



Rys. 7. Pierwsza forma wyboczenia (LBA)



Rys. 8. Druga forma wyboczenia (LBA)

obciążenia oraz przemieszczenia pozostałych węzłów modelu obliczeniowego. Za miarę nośności wyboczeniowej przyjmowano maksymalną wartość mnożnika obciążenia uzyskiwaną w analizie GMNIA czyli pierwsze ekstremum na nieliniowej ścieżce równowagi.

3. Omówienie wyników

Przedmiotem szczegółowych analiz były elementy o kształcie przekroju poprzecznego pokazane na rys. 3 i grubościach 2, 2,5, 3, 4, 5, 6, 7 i 8 mm.

W pierwszym etapie obliczeń wyznaczano krytyczne wartości mnożników wyboczenia i korespondujące z nimi formy wyboczenia (analiza LBA – linear buckling analysis, liniowa analiza stateczności). W Tabeli 1 pokazano wartości otrzymanych mnożników obciążenia (wiersz 3) oraz korespondujących z nimi sił krytycznych

Siły krytyczne przedstawione w Tabeli 1 nie mogą być miarą nośności wyboczeniowej gdyż dotyczą idealnej geometrii (przypadek niemożliwy do spełnienia) oraz obowiązują przy założeniu braku deformacji sprężysto-plastycznych (model idealnie sprężysty).

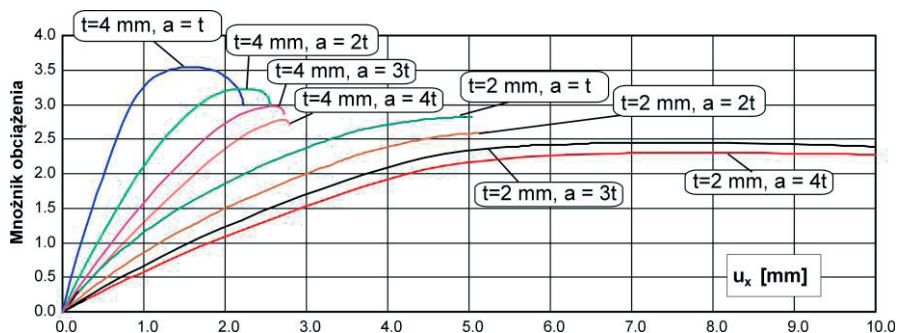
Na rys. 5 i 6 pokazano dwie pierwsze formy utraty stateczności żebra o grubości $t = 2$ mm, a na rys. 7 i 8 dwie pierwsze formy utraty stateczności żebra o grubości $t = 4$ mm.

Tabela 1. Wartości mnożników obciążenia wraz z odpowiadającymi im siłami krytycznymi

Grubość ścianki żebra w mm, $t =$	2	2,5	3	4	5	6	7	8
Pole przekroju w mm^2 $A =$	802,0	1002,5	1203,0	1604,0	2005,0	2406,0	2807	3208
Bezwymiarowy mnożnik obciążenia	3,71	5,65	7,67	10,90	14,07	17,26	20,29	23,29
Siła krytyczna w kN	297,5	566,41	922,7	1748,4	2821,0	4152,8	5695,4	7471,4

Kolejny etap obliczeń polegał na wykonaniu analiz GMNIA dla założonej formy imperfekcji i przyjętej ich amplitudzie. Formy wyboczenia otrzymane w analizie LBA, korespondujące z pierwszą wartością krytyczną posłużyły do wygenerowania geometrii

imperfekcyjnej. Wielkość imperfekcji kształtowano za pomocą amplitudy, a t dobierano dyskretnie jako $a = t, 2t, 3t$ i $4t$ odpowiednio dla każdego z żebier, gdzie t jest grubością blachy żebra.

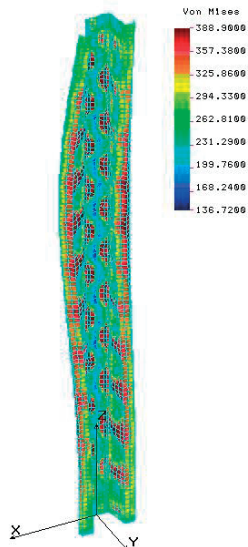


Rys. 9. Ścieżki równowagi (GMNIA) dla dwóch typów żebier ($t = 2$ i $t = 4$ mm) oraz różnych amplitud imperfekcji wstępnych

Na rys. 9 przedstawiono przykładowe ścieżki równowagi dla dwóch typów żebier ($t = 2$ i $t = 4$ mm) oraz różnych amplitud imperfekcji wstępnych. Na osi pionowej wykresu występuje bezwymiarowy mnożnik obciążenia, a na osi poziomej przemieszczenie u_x węzła w miejscu maksymalnych przemieszczeń poziomych żebra.

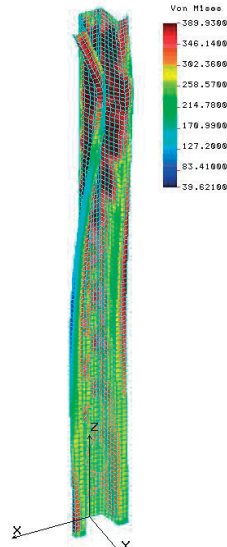
Za miarę nośności przyjmowano pierwsze maksimum na ścieżce równowagi. We

NL1n STRESS Step:35 =2.82543



Rys. 10. Żebro $t = 2$ mm, $a=t$. Forma zniszczenia

NL1n STRESS Step:28 =2.22468



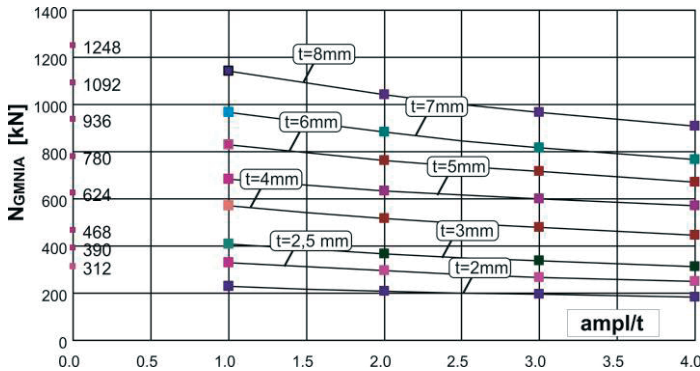
Rys. 11. Żebro $t = 4$ mm, $a=t$. Forma zniszczenia

wszystkich analizowanych przypadkach to maksimum występowało w sposób bardzo wyraźny i zgodnie z zaleceniami PN-EN 1993-1-6 może być traktowane jako miara nośności wyboczeniowej.

Konfiguracja korespondująca z maksimum na ścieżce równowagi może być utożsamiana z konfiguracją inicjującą mechanizm zniszczenia. Na rys. 10 i 11 pokazano rozkład naprężeń ekwiwalentnych na powierzchni $y+$ zgodnych z hipotezą Hubera-Misesa-

Hencky'ego w tych konfiguracjach, odpowiednio dla żebra $t = 2$ mm i amplitudy imperfekcji $a = t = 2$ oraz dla żebra $t = 4$ mm i amplitudy imperfekcji $a = t = 4$ mm.

Na rys. 12 pokazano zależność nośności wybocezeniowej w funkcji amplitudy imperfekcji dla wszystkich analizowanych żeber. Siłę N_{GMNIA} otrzymywano mnożąc otrzymany bezwymiarowy mnożnik obciążenia przez przekrój żebra oraz przez wartość ciśnienia przyłożonego na krawędzi górnej ($p=100$ MPa). Dla odciętej o wartości 0 pokazano wartości sił korespondujące z nośnością plastyczną (iloczyn przekroju i granicy plastyczno-



Rys. 12. Zależność nośności wybocezeniowej (GMNIA) od amplitudy imperfekcji

ści).

Wykresy pokazują znaczny spadek nośności wybocezeniowej w miarę wzrostu amplitudy imperfekcji. W niektórych przypadkach spadek ten sięga nawet 30 % w relacji do nośności plastycznej.

4. Oszacowanie nośności za pomocą wzorów normowych

Nośność żeber pionowych wzmacniających ścianę silosu z blachy falistej można oszacować zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 1993-4-1. Stosowne zapisy są zawarte w pp. 5.3.4.3.3 i 5.3.4.3.4 tej normy.

W Tabeli 2 podano wyniki obliczeń wykonanych zgodnie z postanowieniami wspomnianej normy. W p. 5.3.4.3.4 normy podano zalecenia dotyczące sposobu oszacowania nośności żeber ściennych silosu. Podstawą jest wzór (5.73) z tej normy

$$N_{b,Rd} = 2 \frac{\sqrt{EI_y K}}{\gamma_{M1}} \quad (1)$$

w którym: EI_y – jest sztywnością zgięciową żebra w zginaniu z płaszczyzny ściany, K – jest parametrem sztywności podłoża (tu sztywność płaszcza), γ_{M1} – jest częściowym współczynnikiem bezpieczeństwa równym 1,1.

Jeżeli płaszcz silosu został wykonany z blachy falistej o wysokości fali d i grubości t , to sztywność K można oszacować ze wzoru

$$K = 6 \frac{D_y}{d^3}, \quad (2)$$

w którym

$$D_y = 0,13 E t d^2 \quad (3)$$

Sztywność tak obliczona jest wartością znacznie zaniżoną gdyż wzór ten nie uwzględnia zakrzywienia płaszcza silosu. W Tablicy 2, w kolumnie 8 pokazano wartość K obliczoną ze wzorów (2) i (3).

Parametr sztywności K można wyznaczyć z obliczeń dla schematu zastępczego zgodnego z rys. 5.5 z normy. W Tabeli 2, w kolumnie 5 pokazano wartość K obliczoną na podstawie ugięcia f wycinka płaszcza obciążonego obciążeniem liniowym o wartości 1 kN/m.

Otrzymane w ten sposób nośności żeber pokazano w kolumnach 6 i 9 Tabeli 2. Są to wartości konserwatywne, a w przypadku uproszczonej oceny sztywności K (wzory (2) i (3)) wręcz drastycznie zaniżone (kolumna 9) w Tabeli 2.

W obliczeniach przedstawionych w Tabeli 2 założono, że żebro przylega do płaszcza z blachy falistej o grubości $t = 1,5$ mm i wysokości fali $d = 15$ mm.

Tabela 2. Zestawienie tabelaryczne wyników

Grubość blachy żebra, t [mm]	Moment bezwł. żebra, J_y [mm ⁴]	Grubość blachy cargi, t [mm]	Ugięcie wycinka płaszcza f [m]	Sztywność K [kN/m ²]	N_{BRd} [kN]	D_y [kNm]	Sztywność K [kN/m ²]	N_{BRd} [kN]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t=2$	1015726	1.5	0.01003	99.70	265.15	9.21375	16.38	107.47
$t=2.5$	1275486	1.5	0.01003	99.70	297.12	9.21375	16.38	120.43
$t=3$	1536420	1.5	0.01003	99.70	326.10	9.21375	16.38	132.18
$t=4$	2042204	1.5	0.01003	99.70	375.96	9.21375	16.38	152.39
$t=5$	2565466	1.5	0.01003	99.70	421.39	9.21375	16.38	170.80
$t=6$	3071353	1.5	0.01003	99.70	461.06	9.21375	16.38	186.88
$t=7$	3595565	1.5	0.01003	99.70	498.86	9.21375	16.38	202.20
$t=8$	4107270	1.5	0.01003	99.70	533.18	9.21375	16.38	216.11

5. Podsumowanie

Przedstawiony w pracy sposób oszacowania nośności wyboczeniowej cienkościennych żeber wzmacniających płaszczy stalowego silosu na zboże jest bardzo pracochłonny, prowadzi jednak do realnych wartości nośności przy założonych z góry odchyłkach od geometrii idealnej. Odchyłki te można pomierzyć dla danej technologii produkcji tych elementów i dla danego sposobu montażu silosów.

Pierwsza forma wyboczenia określona w analizie LBA żeber idealnych jest z pewnością najniekorzystniejszą formą imperfekcji i dlatego została wykorzystana w analizach GMNIA. We wszystkich analizowanych przypadkach formy te przyjmowały kształty bardzo realne i jest to dodatkowy argument za trafnością wyboru form imperfekcji wstępnych.

Proponowany w pracy sposób oszacowania nośności wyboczeniowej jest zgodny z ogólnymi procedurami zalecanymi w postanowieniach normy PN-EN 1993-1-6.

Zalecany w normie PN-EN 1993-4-1 sposób oszacowania nośności wyboczeniowej żeber jest względnie prosty, prowadzi jednak do projektowania bardzo konserwatywnego. Ten sposób oceny nośności może służyć jedynie do zgrubnego sprawdzenia nośności żeber.

Jeszcze dokładniejsze oszacowanie nośności wyboczeniowej żeber trwałe połączonych ze ścianą silosu można otrzymać modelując numerycznie płaszczy wraz z żebrami oraz analizując faktyczne obciążenie od magazynowanego ośrodka sypkiego z ewentualnym uwzględnieniem sztywności skonsolidowanego ośrodka sypkiego. Takie analizy wymagają profesjonalnego oprogramowania oraz dużych umiejętności w poprawnym modelowaniu. Trud taki warto podjąć jeżeli celem obliczeń miałyby być silos zaprojektowany bardzo ekonomicznie, a jednocześnie bezpiecznie.

Literatura

- 1 Iwicki P., Wójcik M., Tejchman J., Failure of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns and repair methods using a sensitivity analysis, *Engineering Failure Analysis* 18 (2011) 2064–2083.
- 2 Iwicki P., Wójcik M., Tejchman J., 3D buckling analysis of a cylindrical metal bin composed of corrugated sheets strengthened by vertical stiffeners, *Thin-Walled Structures* 49 (2011) 947–963.
- 3 Marcinowski J., Numeryczne modelowanie zniszczenia żeber pionowych stalowego silosu na zboże z uwzględnieniem ich zespolenia z płaszczem, W: *Problemy naukowo-badawcze budownictwa / red. A. Łapko, M. Broniewicz, J. A. Prusiel . T. 6 : Badawczo-projektowe zagadnienia w budownictwie .-* Białystok : Wydaw. Politechniki Białostockiej, 2008, s. 327—334.
- 4 Marcinowski J., Błażejowski P., Nośność wybozczeniowa walcowego płaszcza silosu w świetle zapisów normy PN-EN 1993-4-1, W: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska .-* 2012, Nr 283, z. 59, s. 152—160.
- 5 Łubiński M., Żółtowski W., *Konstrukcje metalowe Cz. II*, Arkady, Warszawa 2004.
- 6 Rusiński E., *Metoda elementów skończonych- system Cosmos/M*. WKŁ, Warszawa 1994.
- 7 *COSMOS/M, Finite Element Analysis System*, Version 2.9, Structural Research and Analysis Corporation, Electronic Manual, Los Angeles, California 2002.

Buckling resistance of vertical stiffeners of steel silos for grain storage

Paweł Błażejowski, Jakub Marcinowski¹

¹ *Institute of Building Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Zielona Góra, e-mail: P.Blazejowski@ib.uz.zgora.pl, J.Marcinowski@ib.uz.zgora.pl*

Abstract: In steel silos fabricated from horizontally corrugated sheets, the vertical stiffeners (columns) sustain vertical forces as a result of friction of a bulk material against the silo wall. Columns are usually of cold formed steel sections. Due to the fact that stiffener failures are the most frequent cause of silos collapses, it is important to estimate accurately their resistance. The paper deals with numerical modelling of the elastic-plastic collapse of columns. Geometrically and materially nonlinear analyses (GMNIA) were carried out in which imperfections were taken into account. The imperfection forms were taken as a first buckling mode obtained in the linear buckling analysis (LBA). Amplitudes of imperfections were assumed as $a = t, 2t, 3t, 4t$, where t is the thickness of the stiffeners wall. It was revealed that the buckling resistance is very sensitive to the imperfection amplitude. All numerical analyses were performed by the COSMOS/M system based on FEM. Buckling resistance of all analysed stiffeners was calculated also by means of formulae inserted in Eurocode PN-EN1993-4-1. Buckling resistances obtained by the proposed numerical approach were greater than their counterparts being the result of provisions inserted in PN-EN1993-4-1 and appear to be more realistic.

Keywords: steel silo, vertical stiffeners, cold formed section, buckling resistance, imperfections, numerical procedure.