



WADLIWE POŁĄCZENIA ŻEBER PRZYCZYNĄ AWARII STAŁOWYCH SIŁOSÓW O PŁASZCZACH Z BLACH FALISTYCH

EUGENIUSZ HOTAŁA, *eugeniusz.hotala@pwr.edu.pl*

MATEUSZ KUŚNIEREK

ŁUKASZ SKOTNY

JOANNA BONIECKA

Politechnika Wrocławska

Streszczenie: W płaskodennych, walcowych silosach metalowych o płaszcach z blach falistych podstawowymi elementami nośnymi tych płaszczy są pionowe żebra, wykonane często z giętych na zimno kształtowników ceowych lub kapeluszowych. Te ściskane pręty pionowe oparte są na sprężystym podłożu, którym jest walcowa powłoka płaszcza silosu, wykonana z blachy falistej. Pojedyncze żebro ma na wysokości płaszcza zróżnicowany przekrój poprzeczny i składa się z kilku odcinków, łączonych ze sobą na montażu za pomocą śrub. Wykonanie w pełni ciągłego połączenia sąsiadujących odcinków żebra jest dość trudne ze względów technologicznych. Powszechnie stosowane nakładkowe łączniki żebrowe są często wadliwe, gdyż nie spełniają normowego warunku ciągłości żebrowej. W pewnych warunkach eksploatacyjnych taka wada może powodować lokalne przeciążenia i awarię żebrowej wraz z całym płaszczem silosu. Sprężyste odkształcenia płaszcza silosu, jego imperfekcje geometryczne oraz lokalne obciążenia podczas opróżniania mogą wywoływać znaczne mimośrodowe podłużne siły ściskające w żebrowej, szczególnie w miejscach śrubowych połączeń odcinków żebrowej, doprowadzając do utraty nośności płaszcza silosu. W pracy przedstawiono sytuacje eksploatacyjne, które mogą skutkować awariami żebrowej i płaszczy silosów w przypadku braku pełnej ciągłości połączeń poszczególnych odcinków żebrowej.

Słowa kluczowe: silos metalowy, powłoka ortotropowa, połączenie śrubowe, imperfekcje wykonawcze, nośność graniczna, awaria silosu.

1. Wprowadzenie

Płaskodenne silosy z blach falistych są powszechnie stosowane w rolnictwie, jako magazyny zbóż i pasz. Pojemność użytkowa pojedynczych silosów nierzadko przekracza 10 000 m³, a ich średnice przekraczają często 20 m. Płaszcze z blach falistych o poziomo usytuowanych falach wymagają dość gęsto rozmieszczonych żebrowej pionowych, przenoszących całość południkowych obciążeń, działających na płaszcz silosu i przekazywanych przez te żebra na fundament. Ściskane żebra płaszczy wykonywane są często z giętych na zimno kształtowników ceowych lub kapeluszowych, łączonych zakładkowo do blach falistych płaszcza za pomocą śrub. Żebra pionowe wykonywane są z krótkich odcinków, łączonych ze sobą za pomocą śrub, a rozwiązania konstrukcyjne tych połączeń są typu nakładkowego. Wytwórcy tych silosów dążąc do optymalizacji kosztów ich wytwarzania i montażu wykorzystują w sposób ekstremalny, zarówno nośność rozciąganych obwodowo blach falistych, jak i ściskanych osiowo żebrowej płaszczy. Nośność ściskanych żebrowej $N_{b,Rd}$ uwarunkowana jest sztywnością K sprężystego podłoża żebra, którym jest walcowy płaszcz silosu i wyznaczana jest wg normy PN-EN 1993-4-1 na podstawie wzoru (1):

$$N_{b,Rd} = \min \left\{ 2 \frac{\sqrt{EI_y K}}{\gamma_{M1}} ; \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \right\}, \quad (1)$$

gdzie EI_y jest sztywnością zgięciową żebra przy zginaniu z płaszczyzny stycznej do ściany płaszcza silosu, a γ_{M1} jest częściowym współczynnikiem bezpieczeństwa równym 1,1.

Szacowanie sztywności K wg PN-EN 1993-4-1 i rys. 5.5 z tej normy daje drastycznie zaniżone nośności żeber, co wykazano w [1]. W rzeczywistości dość często sztywność ta jest na tyle duża, że nośność żebra jest zbliżona do nośności plastycznej, a współczynnik wyboczeniowy żebra χ_y jest bliski wartości 1,0. Nośność wyboczeniowa żeber zależy również wyraźnie od imperfekcji geometrycznych żeber i całego płaszcza, co wykazano m.in. w [2]. Awarie płaszczy silosów z blachy falistej objawiają się najczęściej wyczerpaniem nośności ściskanych żeber, co niejednokrotnie skutkuje całkowitym zniszczeniem [1, 3, 4, 5] lub silną deformacją płaszcza silosu [2].

W realnych płaszczach silosów płaskodennych, posadowionych na betonowej płycie fundamentowej, promieniowe przesuwu podstaw ściskanych żeber, wywoływane przez poziome parcie materiału wypełniającego na płaszcz, są na ogół uniemożliwiane przez siły tarcia pomiędzy podstawami żeber a fundamentem lub są ograniczone z powodu błędów konstrukcyjnych czy też wykonawczych. Powstaje więc mimośród e pionowego obciążenia N pojedynczego żebra płaszcza (rys. 2), który skutkuje nieprzewidzianym zginaniem żebra i stwarza realne ryzyko wyczerpania jego nośności, gdyż normowe procedury sprawdzania nośności żebra nie przewidują działania momentu zginającego w żebrze. Zginanie żeber może być również wynikiem deformacji płaszcza, wywołanych lokalnymi obciążeniami, szczególnie wyraźnymi podczas niecentrycznego opróżniania silosu.

Oprócz naturalnego dodatkowego wyężenia żebra z powodu pojawienia się w nim zginania, występuje dość często zjawisko rozwierania się śrubowych styków odcinków żeber płaszcza silosu, gdyż powszechnie stosowane rozwiązania konstrukcyjne tych styków nie zapewniają pełnej ciągłości zgięciowej żeber w miejscu styków, co jest wymagane m.in. w p. 5.3.4.1(4) normy PN-EN 1993-4-1. Rozwarcie kątowe styków (p. 4) skutkuje powstaniem mimośrodu e obciążenia żebra i dość dużym momentem zginającym w żebrze, co może doprowadzić do wyczerpania jego nośności i awarii silosu.

2. Skutki braku przesuwów promieniowych podstaw żeber na fundamencie

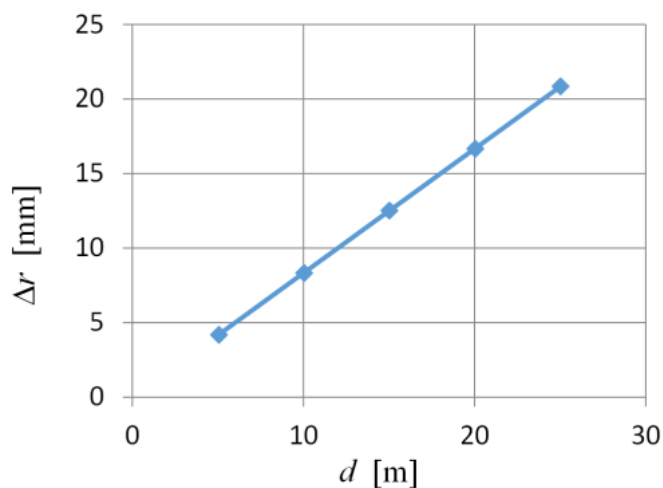
Po wypełnieniu walcowej powłoki płaskodennego silosu odkształca się ona sprężysto w kierunku obwodowym, a promień takiej powłoki zwiększa się o wartość Δr (rys. 1), którą można wyznaczyć ze wzoru (2):

$$\Delta r = \frac{\sigma_{\theta} d}{2E}, \quad (2)$$

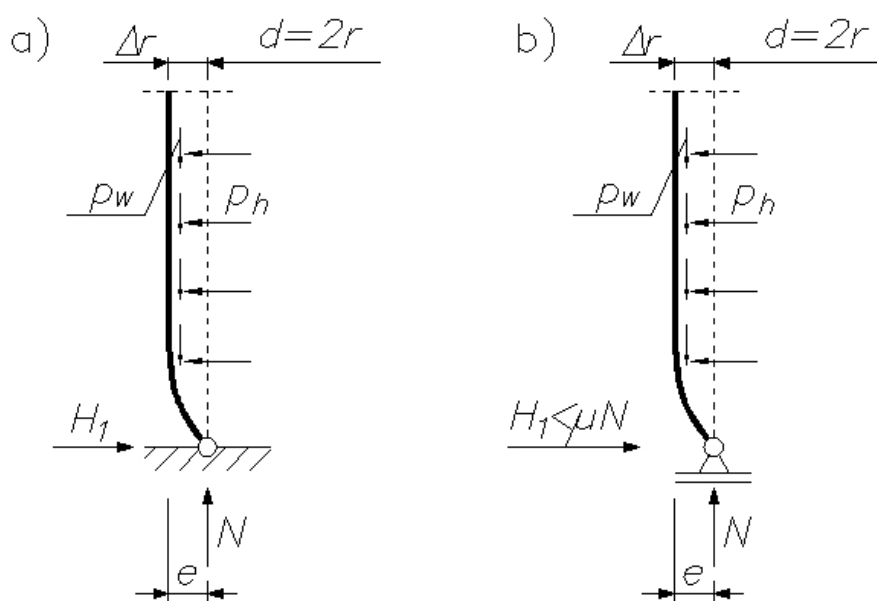
gdzie: σ_{θ} – naprężenia obwodowe w walcowej powłoce płaszcza z blachy falistej, $d = 2r$ – średnica płaszcza silosu, E – moduł Younga stali blach płaszcza.

Jeśli grubości t blach falistych płaszcza silosu są dobierane z uwagi na prawie pełne wykorzystanie nośności na obwodowe rozciąganie, wywołane parciem bocznym p_h materiału wypełniającego silos, to przyrost promienia Δr będzie na całej wysokości płaszcza prawie taki sam, za wyjątkiem górnej i dolnej jego krawędzi. Nawet jeśli połączenie żeber płaszcza z płytą fundamentową przewidziane jest jako przesuwne w kierunku promieniowym, to z reguły do tego przesuwu nie dochodzi i żebra są zginane z uwagi na działanie reakcji pionowej N na mimośrodku $e = \Delta r$ (rys. 2) oraz działanie reakcji poziomej H_1 (rys. 2). Przy realnych wartościach współczynnika tarcia $\mu = 0,1 - 0,3$, występującego na styku blachy podstawy żebra z blachą podkładki na fundamencie, parcie boczne materiału p_h nie ma możliwości pokonać siły tarcia $H_1 = N \times \mu$ w tym nominalnie przesuwnym połączeniu żebra z fundamentem.

Tak więc w dolnej części płaszcza takiego silosu występuje zginanie żebra, a maksymalny moment zginający żebro ma w praktyce wartość zbliżoną do $M \approx N \times \Delta r$. Wartość reakcji poziomej H_1 (rys. 2) trzeba wyznaczyć numerycznie i uwzględnić ją również w wartości momentu zginającego M , podobnie jak i oddziaływania materiału w silosie.

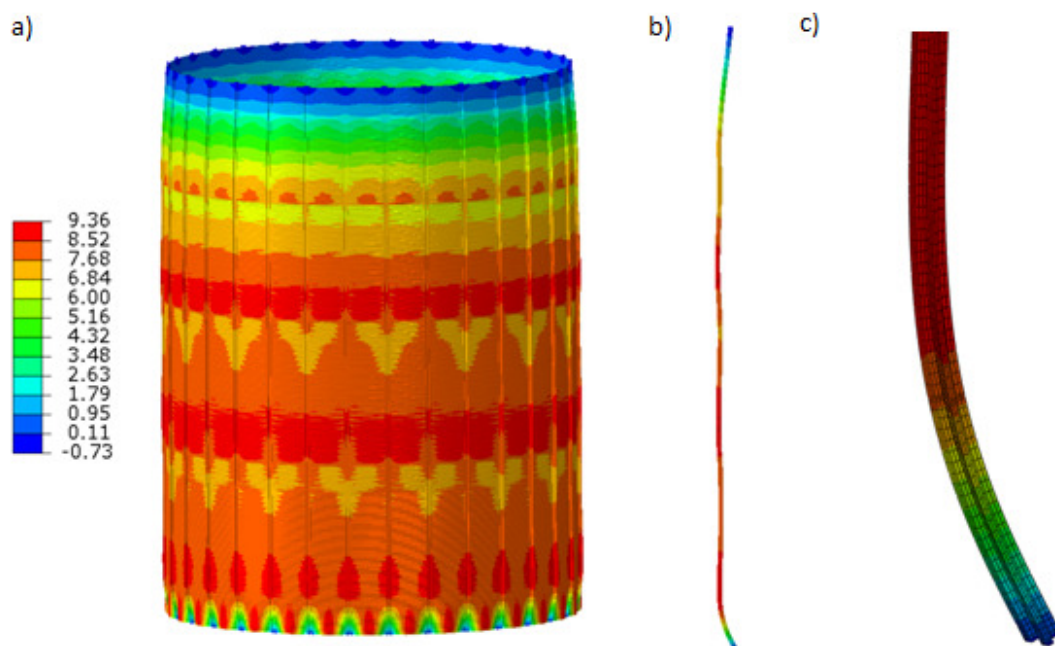


Rys. 1. Odształcenia promieniowe Δr powłoki płaszcza silosu o średnicy d przy $\sigma_\theta = 350 \text{ N/mm}^2$



Rys. 2. Odształcenia promieniowe żebra płaszcza silosu i reakcje fundamentu na żebro przy przegubowym (a) lub przesuwym (b) połączeniu żebra z fundamentem

Z uwagi na powszechną optymalizację przekrojów żeber, mają one najczęściej, w dolnych partiach silosu, wykorzystany prawie w 100% warunek nośności na ściskanie osiowe. Dodatkowe obciążenie momentem zginającym M w rejonie fundamentu może doprowadzić dość łatwo do wyczerpania nośności ściskanego i zginanego pojedynczego żebra płaszcza. Obliczony dla realnych silosów ($d = 15\text{--}20 \text{ m}$) udział momentu zginającego M w nośności typowego ceowego lub kapeluszowego żebra na zginanie wynosi ok. 20–40%, a więc o tyle może być przekroczony jego warunek nośności jako pręta ściskanego i zginanego. Stan ten może prowadzić do zagrożenia awaryjnego żeber płaszcza silosu.



Rys. 3. Odształcenia promieniowe Δr [mm] powłoki płaszcza silosu z nieprzesuwnym oparciem żeber: a) ogólny widok odształceń, b) odształcenia pojedynczego żebra, c) część dolna żebra

Na rys. 3 przedstawiono wyniki analiz numerycznych MES deformacji promieniowych Δr płaszcza silosu i jego żeber, zamocowanych nieprzesuwnie w fundamencie i obciążonego symetrycznie podczas opróżniania. Średnica analizowanego silosu płaskodennego wynosiła $d = 15,28$ m, wysokość komory $h = 21,32$ m, kąt spadku dachu stożkowego wynosił 34° . W silosie składowana była pszenica, a właściwości ośrodka były następujące: $\gamma = 8,5$ kN/m³, średnie wartości $\mu_m = 0,54$, kąt tarcia wewnętrznego $\varphi_m = 30^\circ$, $K_m = 0,54$. Opróżnianie silosu było centryczne, a żebra kapeluszowe były zamontowane obwodowo w rozstawie co 1,5 m.

Zastosowano blachę falistą o wysokości fali 15 mm i grubości $t = 0,9\text{--}1,8$ mm. Zastosowane żebra w środkowej części miały przekrój efektywny $A_{eff} = 2250$ mm² oraz moment bezwładności $I_y = 3\,051\,621$ mm⁴. W dolnej części płaszcza żebra miały przekrój $A_{eff} = 3600$ mm² i moment bezwładności $I_y = 4\,908\,494$ mm⁴. Wszystkie żebra wykonane były ze stali o $f_y = 390$ N/mm².

Maksymalne przemieszczenia radialne (rys. 3) wyniosły $\Delta r = 9,3$ mm przy naprężeniach obwodowych $\sigma_\theta = 250$ N/mm², co jest zbliżone do wartości obliczonej ze wzoru (1).

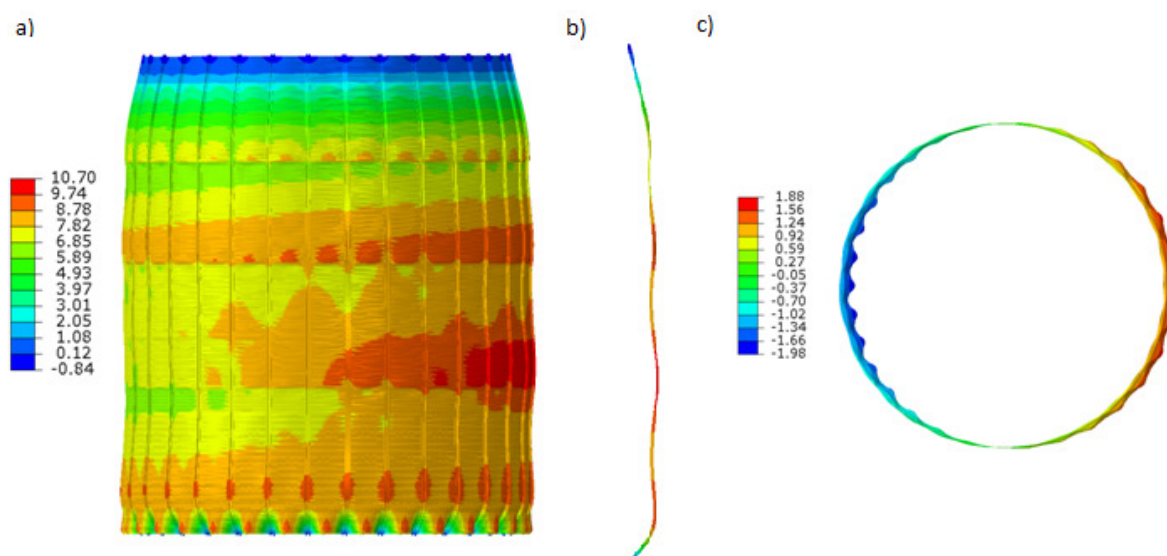
Obliczone numerycznie reakcje podporowe w nieprzesuwnym zamocowaniu żebra wynosiły: pozioma $H_1 = 13,65$ kN, a pionowa $N = 689,99$ kN. Przesuw poziomy w przypadku pokazanym na rys. 2b byłby możliwy jedynie w przypadku wystąpienia współczynnika tarcia $\mu < 0,02$, co w praktyce budowlanej nie jest możliwe do osiągnięcia. W praktyce projektowej należy więc uwzględniać nieprzesuwnie podparcie żeber na fundamencie, gdyż przesuw promieniowy jest w praktyce niemożliwy z uwagi na dużą siłę tarcia w połączeniu.

3. Deformacje zgięciowe żeber w wyniku lokalnego parcia poziomego

W metalowych silosach o przekroju kołowym mogą wystąpić lokalne parcia poziome przy opróżnianiu silosu, których rozkład pokazany jest na rys. 5.4a w normie PN-EN 1991-4. Taki rozkład parcia prowadzi do lokalnych deformacji przekroju kołowego płaszcza (rys. 4c) i zginania jego żeber. Również podczas opróżniania silosu przez otwór na dużym mimośrodku powstaje niecentryczny kanał przepływu materiału, który skutkuje powstaniem nierównomiernego parcia poziomego na płaszcz (rys. 5.5 w PN-EN 1991-4) i owalizacją kołowego

przekroju płaszcza. Oba wymienione przypadki obciążenia lokalnego lub nierównomiernego prowadzą do deformacji zgięciowych żeber płaszczy. Na rys. 4 przedstawiono obraz deformacji zgięciowych żeber płaszcza płaskodennego silosu na pszenicę (o geometrii jak na rys. 3), w którym oprócz obciążenia symetrycznego podczas opróżniania silosu uwzględniono parcie lokalne wg rys. 5.4a z normy PN-EN 1991-4. Parcie lokalne przyłożono na wysokości ok. 6 m ponad poziomem dna silosu, w strefie tworzenia się pozornego leja podczas centrycznego opróżniania płaskodennego silosu.

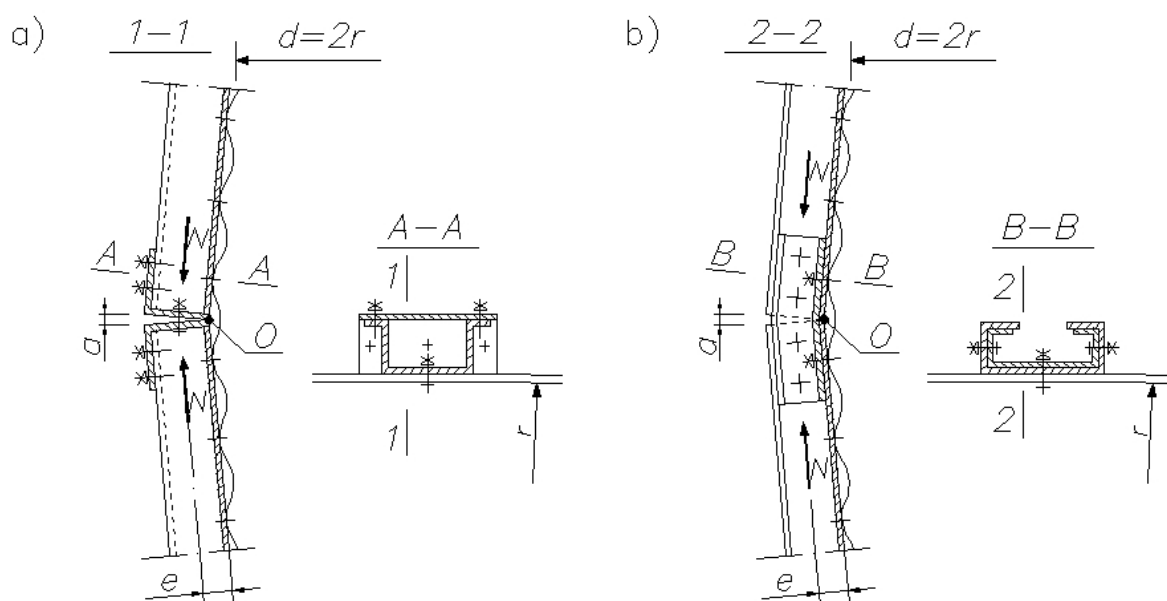
Przedstawione na rys. 4 deformacje zgięciowe w przypadku obciążenia lokalnego płaszcza silosu mogą mieć istotny wpływ na zagrożenie awaryjne żeber silosów, w których połączenia ich odcinków nie są w pełni ciągłe (sztywne). Promieniowe odkształcenia żeber płaszcza silosu i strzałki wygięcia ich osi nie muszą bowiem być duże, aby wystąpiło zjawisko rozwarcia styków montażowych w tych żebrach. Rozwarcie styku przegubowego w dolnej części żebra w przypadku pokazanym na rys. 3 i 4 wyniosło $a = 0,8$ mm (rys. 5a). To zjawisko jest bardzo niebezpieczne, gdyż może ono doprowadzić do poważnych przeciężeń żeber, a mechanizm ich powstania przedstawiony jest w p. 4.



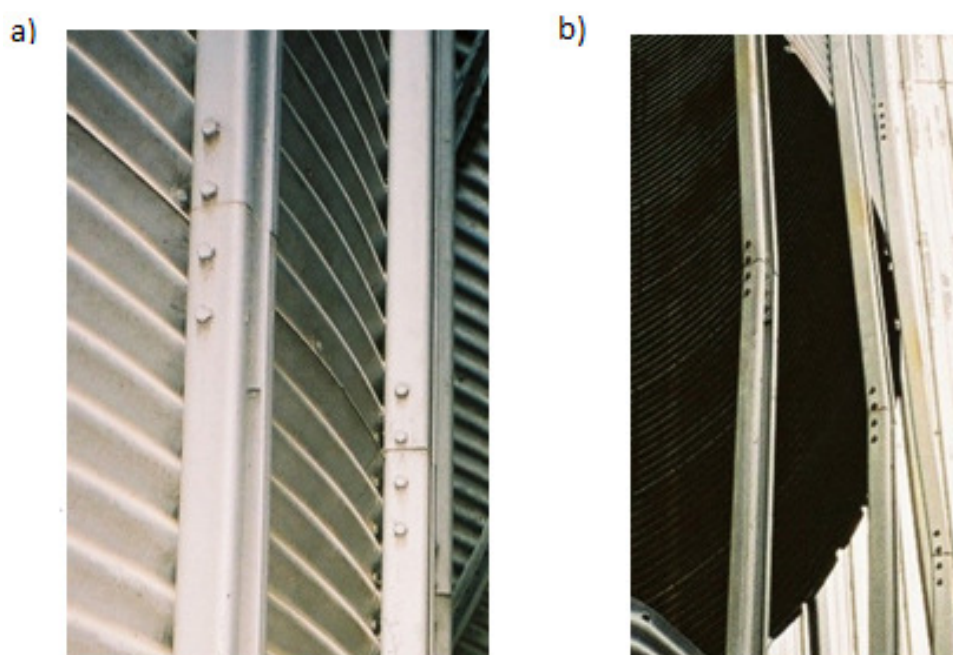
Rys. 4. Zgięciowe deformacje żeber płaszcza silosu (opis w tekście): a) przemieszczenia radialne płaszcza, b) przemieszczenia radialne najbardziej zdeformowanego żebra, c) przemieszczenia radialne w najbardziej odkształconym przekroju poziomym (od samego obciążenia lokalnego)

4. Niebezpieczne rozwarcia styków żeber wskutek ich deformacji zgięciowych

Deformacje zgięciowe żeber wystąpić mogą zarówno wskutek braku przesuwów poziomych w oparciach żeber na fundamencie, jak i w przypadku wystąpienia lokalnych obciążeń podczas opróżniania silosu. W realnych konstrukcjach silosów trudno spotkać konstrukcje połączeń odcinków żeber płaszcza silosu z blach falistych, które mają pełną sztywność zgięciową. Te połączenia mają często nominalnie przegubowy charakter (rys. 5a) lub częściowo ciągły w przypadku zastosowania nakładek lub wkładek uciągających (rys. 5b). Otwory we wkładkach lub w nakładkach uciągających są z reguły powiększone w celu ułatwienia prac montażowych, stąd przy pojawieniu się zginania styki takie mogą ulec pewnemu rozwarcia o wartości a (rys. 5) na jednej z krawędzi czołowych łączonych odcinków żebra.



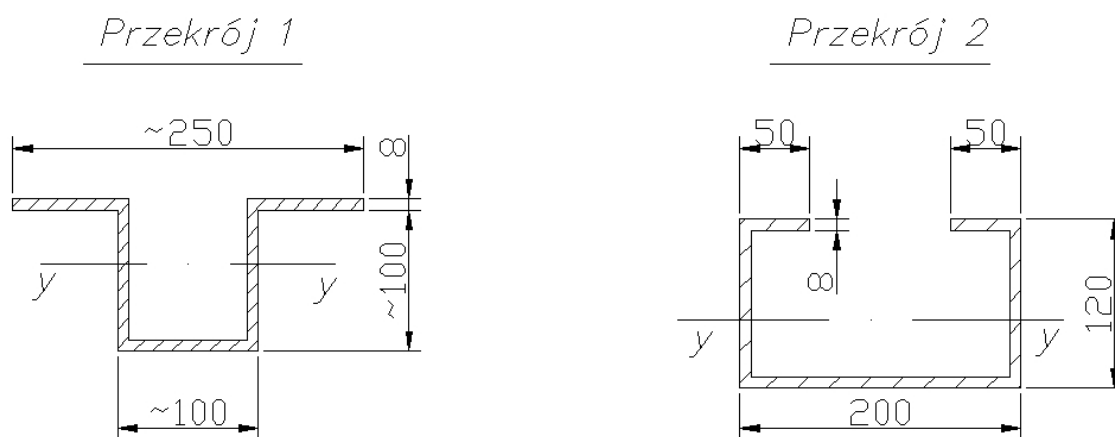
Rys. 5. Rozwarcie krawędzi czołowych odcinków żebra: a) styk przegubowy, b) styk nakładkowy



Rys. 6. Połączenie ceowych odcinków żeber płaszcza silosu: a) widok połączeń, b) rozwarcia styków przy braku blach falistych płaszcza

Nakładki w śrubowych połączeniach żeber wykonuje się na ogół z podobnego kształtownika co kształtownik żebra (rys. 5b i 6). W dużych silosach nie jest możliwe przeniesienie znacznej siły osiowej N z jednego górnego odcinka żebra na jego dolny odcinek za pomocą kilku śrub (na ogół 5 lub 6 szt.) w połączeniu nakładkowym (rys. 6b). Siła ta przekazywana jest przez docisk obu krawędzi, a rozwarcie styku sprawia, że docisk ten koncentruje się w rejonie krawędzi oznaczonej na rys. 5 jako „O”. Krawędź ta może się uplastyczyć, a następnie może nastąpić uplastycznienie całego przekroju i zniszczenia żebra w rejonie takiego styku. Powiększone otwory na śruby w takim połączeniu sprzyjają powstawaniu zjawiska rozwarcia styku.

Podstawowym skutkiem rozwarcia styku jest powstanie znacznego mimośrodru e (rys. 5) przekazywania siły osiowej N z jednego odcinka żebra na drugi. Jeśli weźmie się pod uwagę, że w „zoptymalizowanych” konstrukcjach silosów siła N w żebdach jest praktycznie równa nośności żebra $N_{b,Rd}$ na osiowe ściskanie, to działanie niezamierzonego momentu zginającego o dość dużej wartości $M_y = N \times e$ jest czynnikiem mogącym doprowadzić do znacznego przeciążenia żebra i poważnej awarii silosu.



Rys. 7. Przekroje poprzeczne analizowanych żebier płaszcza silosu (opis w tekście)

Aby przedstawić skutki rozwarcia styku odcinków żebier płaszcza wykonano analizy obliczeniowe, biorąc pod uwagę charakterystyki geometryczne przekrojów poprzecznych żebier, pokazanych na rys. 7. Zastosowano stal o granicy plastyczności $f_y = 390 \text{ N/mm}^2$. Przyjęto, że rozwarcie dotyczy górnej (zewnętrznej) krawędzi żebra. Założono pełne wykorzystanie nośności plastycznej obu żebier z uwagi na osiowe ściskanie, a przekrój efektywny A_{eff} był równy pełnemu polu przekroju A . Jako siłę osiową N w żebrze przyjęto jego obliczeniową nośność plastyczną. Wyznaczono obliczeniową nośność przekrojów na zginanie $M_{y,Rd}$ względem osi $y - y$.

W przypadku przekroju 1 ($A = 36 \text{ cm}^2$, $I_y = 617,6 \text{ cm}^4$) uzyskano wykorzystanie nośności na zginanie $(M_{y,Ed} = 80,5 \text{ kNm}) / (M_{y,Rd} = 35,1 \text{ kNm}) = 2,29$, a w przypadku przekroju 2 ($A = 40,64 \text{ cm}^2$, $I_y = 854,5 \text{ cm}^4$) uzyskano $(M_{y,Ed} = 71,3 \text{ kNm}) / (M_{y,Rd} = 46,9 \text{ kNm}) = 1,52$. Uzyskane wartości wykorzystania nośności na zginanie pokazują bardzo duży stopień przekroczenia tej nośności od dodatkowego zginanego żebra. Uwzględniając prawie pełne wykorzystanie nośności na ściskanie, można stwierdzić, że zagrożenie awaryjne w wadliwych stykach żebier jest więc bardzo realne.

5. Wnioski końcowe

W projektowaniu pionowych żebier płaszczy płaskodennych silosów z blach falistych oprócz ściskania osiowego należy zawsze uwzględniać zginanie żebier, wynikłe z realnego braku możliwości przesuwów promieniowych podstaw tych żebier (rys. 2). Zginanie żebier występuje również wskutek lokalnych i niesymetrycznych obciążeń od materiału wypełniającego silos (rys. 4). Deformacje, towarzyszące zginaniu żebier płaszczy silosów stalowych z blach falistych, mogą wywoływać bardzo niekorzystne efekty w postaci rozwierania się śrubowych styków pojedynczych odcinków żebier (rys. 5), jeśli te połączenia nie spełniają warunku ciągłości. Pozornie niewielkie obciążenia powodujące deformacje żebier, same w sobie nie muszą powodować znacznego wyłączenia przekroju, jednak na skutek wadliwego rozwiązania konstrukcyjnego styków, umożliwiającego ich częściowe lub pełne rozwarcie,

w żebrach pojawiają się duże mimośrodowo przekazywania sił osiowych i wynikłe stąd ich zginanie. Dodatkowy moment zginający w żebrze wskutek rozwarcia styku odcinków tego żebra może wywołać jego przeciążenie i awarię płaszcza silosu.

Należy również zaznaczyć, że powszechnie stosowane połączenia żeber w silosach z blach falistych nie spełniają warunków normowych dotyczących wymaganej ciągłości zgięciowej żeber w silosach, co sprzyja powstawaniu omawianych rozwarć styków. Niektóre awarie silosów z blach falistych wynikły z wad konstrukcyjnych i wykonawczych tych połączeń. Należy zatem poszukiwać takich rozwiązań konstrukcyjnych, które zapewnią ciągłość, a zarazem łatwość wykonania połączeń poszczególnych odcinków żeber, a innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne w tym zakresie jest obecnie w trakcie badań doświadczalnych, prowadzonych przez autorów niniejszej pracy.

Literatura

1. Błazejowski P., Marcinowski J. Nośność wyboczeniowa żeber wzmacniających ściany stalowego silosu na zboże. *Budownictwo i Architektura*, nr 12(2)/2013, s. 189–196.
2. Iwicki P., Wójcik M., Tejchman J. Failure of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns and repair method using sensitivity analysis. *Engineering failure Analysis*, nr 18/2011, s. 2064–2083.
3. Biegus A., Hotała E. Katastrofa stalowego silosu na pasze. *Materiały XXI Konferencji Naukowo-Technicznej „Awaryjne Budowlane”*, Szczecin-Międzyzdroje, 20–23 maja 2003, s. 417–424.
4. Hotała E. Awaryjność silosów z blachy falistej. *Materiały Budowlane*, nr 2/2006, s. 37–39.
5. Hotała E. Stalowe silosy na produkty rolne – rozwiązania konstrukcyjne, analizy nośności, trwałość, awarie. *Politechnika Lubelska*, Lublin 2013, s. 231–243.

INCORRECT CONNECTIONS OF COLUMNS AS A CAUSE OF ISSUES IN STEEL SILOS MADE OF CORRUGATED SHEETS

Abstract: In flat-bottomed cylindrical steel silos made of corrugated sheets, most important structural elements are columns which are mostly made of cold-formed C or Ω sections. Those axially compressed elements are supported elastically by steel walls made of corrugated sheets. Single column have several cross-sections along its height, and is connected on site with screws. Due to technological reasons it is hard to create a fully rigid connection of said sections of columns. Commonly used lap-joints are often wrongly made and do not meet the rigidity criteria set in codes. In certain conditions such defect can lead to local overload of columns which in turn can lead to serious damage to entire silo. Elastic deformations and geometric imperfections of silo walls, as well as local loads due to emptying the silo can cause serious excentricities in carrying the compression load, especially in regions of lap-joints which may lead to structural failure. In this paper exploitation conditions are being presented that may lead to failure of columns and walls of silos in case of lack of rigidity in connections of column sections.

Keywords: Metal silo, corrugated sheet, screwed connection, imperfections, limit load, silo failure.

Obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcss.pl>), grant obliczeniowy Nr 293.