dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWr^{1)*)} dr inż. Łukasz Skotny¹⁾ mgr inż. Mateusz Kuśnierek¹⁾ mgr inż. Joanna Boniecka¹⁾

Połączenia pionowych żeber jako słabe miejsca stalowych silosów z blach falistych

Connections of vertical columns as a weak regions in steel silos made from corrugated sheets

DOI: 10.15199/33.2015.09.40

Streszczenie. W silosach z blach falistych pionowe żebra przejmują wszystkie południkowe oddziaływania na walcowy płaszcz. Żebra te wymiaruje się zgodnie z normą EN 1993-4-1 jako ściskane osiowo pręty oparte na podłożu sprężystym, którym jest walcowa powłoka z blach falistych. W wysokich silosach konieczne jest wykonywanie żeber z kilku odcinków na wysokości płaszcza, a połączenia tych odcinków wywołują często niekorzystne efekty mimośrodów przekazywania sił osiowych w żebrach. Dodatkowe obciążenie żeber nieprzewidzianymi momentami zginającymi może prowadzić do poważnych awarii silosów z blach falistych. W artykule wykazano wpływ rozwarcia połączeń żeber na istotny wzrost ich wytężenia.

Slowa kluczowe: analiza numeryczna, silos metalowy, stateczność powłok.

ilosy stalowe z blach falistych bardzo często wykorzystuje się w rolnictwie do przechowywania zbóż i pasz. Najczęściej posadawia się je na żelbetowych płytach fundamentowych, będących jednocześnie płytami dennymi. Blacha falista ma fałdy ułożone poziomo (zwiększa to znacznie nośność powłoki na ściskanie obwodowe), co sprawia, że konieczne jest stosowanie żeber pionowych (słupków) przenoszących obciążenia południkowe. Ze względów technologicznych stosowane żebra mają zazwyczaj przekrój otwarty nazywany kapeluszowym (rysunek 1) i są gięte na zimno z cienkich ocynkowanych blach. Żebra te przenoszą obciążenia pionowe całej powłoki płaszcza, m.in. od tarcia materiału sypkiego. Dość często w praktyce projektowej korzysta się z założenia, że żebra przenoszą siły południkowe, a blacha falista - siły obwodowe i wtedy wyznaczenie nośności żeber N_{b. Rd} wg normy PN-EN 1993-4-1 sprowadza się do uwzględnienia nośności przekroju żebra na ściskanie oraz stateczności całego żebra jako ściskanego pręta na podłożu sprężystym wg wzoru (1):

102



Rys. 1. Analizowany przekrój żebra kapeluszowego – wymiary [mm]

Fig. 1. Analised cross-section of the column. Dimensions in [mm]

$$N_{b,Rd} = min \begin{cases} 2 \frac{\sqrt{EI_yK}}{\gamma_{M1}} \\ \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \end{cases}$$

We wzorze (1) K jest sztywnością podłoża sprężystego, EI. sztywnością zgięciową żebra przy zginaniu z płaszczyzny stycznej do ściany płaszcza silosu, a $\gamma_{\rm M1}$ częściowym współczynnikiem bezpieczeństwa równym 1,1. Jest zalecenie normowe, aby połączenia żeber miały zapewnioną sztywność zgięciową, ale stosowane w praktyce połączenia nie spełniają najczęściej tego wymagania.

Normowy algorytm do wyznaczania sztywności podłoża sprężystego K budzi wiele wątpliwości i daje zazwyczaj mocno zaniżone wartości tej sztywności i nośności żeber [1]. Realna sztywność powłoki może

(Oryginalny artykuł naukowy)

Abstract. In steel silo made of corrugated sheets vertical columns carry all of the longitudinal loads that are transferem to the silo shell. Those columns according to code EN 1993-4-1 are treated as compressed elements on elastic foundation, in this case shell made of corrugated sheets. In high silos it is necessary to make connections along the length of said columns, and those connections often create eccentricities. Additional bending moments caused by those eccentriticities may lead to serious damage of silos made of corrugated sheets. In this paper influence of gaps in column connections is being analyzed.

Keywords: numerical analysis, steel silo, shell stability.

być na tyle duża, że to nośność plastyczna przekroju decyduje o nośności żebra. Istotny wpływ na nośność żeber mają również imperfekcje, co wykazano w pracy [2]. Awarie płaskodennych silosów z blach falistych wynikają najczęściej z wyczerpania nośności żeber płaszczy silosów [1, 3, 4].

Deformacje zgięciowe żeber płaszczy silosów

Po napełnieniu płaszcz silosu odkształca się sprężyście w kierunku promieniowym wskutek parcia poziomego p, materiału wypełniającego silos. W rzeczywistych silosach wartość tego odkształcenia ∆r wynosi nawet ponad 20 mm i jeśli grubość blach dobiera się stosownie do rosnącej wartości parcia p, w miarę zbliżania się do krawędzi dolnej płaszcza, to osie żeber są w przybliżeniu proste, a żebra nie są zginane.

W projektowaniu silosów płaskodennych z blach falistych stosuje się założenie, że podparcie żeber na płycie fundamentowej zapewnia im swobodę radialnego przesuwu. Stosowane rozwiązania konstrukcyjne (otwory owalne i przekładki zmniejszające tarcie) nie gwarantują możliwości promieniowego przesuwu podstaw żeber w miejscu ich mocowania do fundamentu (rysunek 2).

Analizy numeryczne powłok płaszczy silosów z blach falistych wykazały, że po-

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Autor do korespondencji:

e-mail: eugeniusz.hotala@pwr.edu.pl



Rys. 2. Promieniowe odkształcenia Δr żebra płaszcza silosu oraz reakcje fundamentu przy przegubowym (a) lub przesuwnym (b) połączeniu żebra z fundamentem Fig. 2. Radial deformation Δr of column with reaction forces on foundation with hinged (a) or sliding (b) support

mimo różnych zabiegów konstrukcyjnych, podstawy żeber nie będą się przesuwać promieniowo na fundamentach pod wpływem parcia wewnętrznego p_h . Powodem takiego stanu jest zbyt duża siła tarcia $\mu \cdot N_1$ w miejscu mocowania żebra, która jest większa od oddziaływania poziomego H_1 (rysunek 2b), które by się pojawiło w nieprzesuwnym zamocowaniu podstawy żebra do fundamentu (rysunek 2a).

Analizowano silos z blachy falistej średnicyd=15,28 m, wysokości komory h=21,32 m, w którym składowana była pszenica a) 1-1 d=2r $(\gamma = 8.5 \text{ kN/m}^3, \mu_m = 0.54, \phi_m = 30^\circ, K_m = 0.54).$ W rozmieszczonych co 1,5 m na obwodzie silosu żebrach kapeluszowych (rysunek 1) reakcje na pojedynczych nieprzesuwnych podporach (rysunek 2a) od oddziaływań składowanej pszenicy i ciężaru własnego konstrukcji wynosiły: $N_1 = 690 \text{ kN}, H_1 = 14 \text{ kN}.$ Przy tak dużej wartości reakcji pionowej N, współczynnik tarcia µ, który pozwalałby na przemieszczenia radialne żeber, musiałby być mniejszy niż 0,02, co jest nieosiągalne w praktyce budowlanej. Pozioma siła H, oddziaływania płaszcza nawet na przesuwną podporę (rysunek 2b) jest zbyt mała, aby pokonać dużą siłę tarcia µ · N₁. Nawet z zastosowaniem typowych przekładek poślizgowych (wykonanych ze stali) współczynnik tarcia jest ok. dziesięciokrotnie za duży, by był możliwy poziomy, radialny przesuw podstaw żeber silosu. W związku z tym w rejonie dolnych części żeber występują deformacje zgięciowe i zginanie od działania reakcji N, na mimośrodzie e, (rysunek 2).

Wytężenie żeber wskutek rozwarcia styków

Deformacje zgięciowe w przypodporowych fragmentach płaszcza i wywołane nimi zginanie żeber (rysunek 2) zwiększa wytężenie osiowo ściskanych żeber. Optymalizacja konstrukcji silosu prowadzi często do pełnego wykorzystania nośności żeber, określonej wzorem (1). Dodatkowe, nieprzewidziane zginanie żeber momentem $M \approx N_1 \cdot e_1$ może powodować znaczne przekroczenie ich nośności. Własne analizy obliczeniowe wpływu zginania żeber ciągłych (bez styków), pokazanych na rysunku 1, wykazały wzrost wykorzystania nośności ściskanych i jednocześnie zginanych żeber o 20 ÷ 40%. Z uwagi na zaniżenie rzeczywistej nośności podczas korzystania ze wzorów normowych na sztywność płaszcza K (1), ciągłe żebra mają niekiedy z tego powodu przypadkowy zapas nośności i dzięki temu wiele silosów nie uległo jeszcze awarii.

Deformacje zgięciowe pojedynczego żebra, w którym występują styki o zbyt małej sztywności zgięciowej, mogą wywoływać znacznie większe lokalne zginanie żeber, niż to wynika z mimośrodu e₁ reakcji N₁ (rysunek 2). Stosowane dość powszechnie styki montażowe odcinków żeber mają bardzo małą sztywność zgięciową (rysunek 3b) lub są wręcz stykami przegubowymi (rysunek 3a) i przy zginaniu żeber może nastąpić rozwarcie styku. Połączenia nakładkowe (rysunek 3b) mają z reguły powiększone



Rys. 3. Rozwarcia styków w strefie zginania żeber: a) styki przegubowe; b) styki zakładkowe *Fig. 3. Open joint in region of column bending: a) hinged connection; b) overlaping connections*

otwory na śruby i dochodzi w nich do przesuwów, skutkujących załamaniem osi zginanych żeber. Rozwarcie styku prowadzi do przesunięcia punktu O, w którym przekazywana jest siła osiowa N₁ z jednego odcinka żebra na drugi. Powstaje więc znaczny mimośród e₀ obciążenia osiowego N₁ oraz dodatkowy moment zginający żebro w miejscu styku o znacznej wartości $M = N_1 \cdot e_0$, gdyż mimośród e₀ jest z reguły znacznie większy niż mimośród e₁ (rysunek 2).

W analizowanym przypadku żebra (rysunek 1) przyjęto dość często stosowaną stal o granicy plastyczności $f_y = 390$ MPa. Przyjęto, że siła N₁, ściskająca żebro o przekroju jak na rysunku 1, odpowiada pełnej nośności plastycznej przekroju tego żebra, a pole efektywne przekroju Aeff jest równe pełnemu polu przekroju A i wynosi 36 cm². Przy pełnym rozwarciu styku mimośród e jest odległością pomiędzy środkiem ciężkości przekroju żebra a punktem obrotu podczas rozwarcia styku O (rysunek 3). Obliczony moment zginający żebro wynosi M_{v Ed}=80,5 kNm. Analizowane żebro ma nośność przekroju na zginanie $M_{vRd} = 35,1 \text{ kNm},$ co oznacza, że została ona przekroczona ponad dwukrotnie. Jeśli uwzględni się pełne wykorzystanie nośności przekroju na ściskanie, to przekroczenie nośności ściskanego i lokalnie zginanego żebra będzie ponad trzykrotne. Wystąpi więc realne i poważne zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji silosu. Własne badania doświadczalne potwierdziły jednoznacznie bardzo niekorzystne skutki rozwarcia styków.

Podsumowanie

Przedstawione przykłady wskazują na to, że w ocenie wytężenia żeber silosów z blach falistych należy uwzględniać ich zginanie, choć nie jest to zalecane w procedurze normowej. Zginanie pojawia się m.in. na skutek braku realnej możliwości przesuwów promieniowych żeber w miejscu połączenia ich z fundamentami, a także wsku-

tek rozwarcia styków montażowych żeber w strefach występowania ich deformacji zgięciowych. Największe tego typu deformacje zgięciowe żeber występują w strefach podporowych płaskodennych silosów, dlatego też należy unikać stosowania styków montażowych żeber w tych częściach płaszczy silosów. Dodatkowe zginanie żeber wskutek rozwarcia styków jest często przyczyną poważnych awarii silosów z blach falistych. Wykonanie styków montażowych żeber o właściwej sztywności zgięciowej nie jest

łatwym zadaniem z uwagi na różne uwarunkowania technologiczne i montażowe.

Literatura

[1] Błażejowski 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 "Awarie 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.

Przyjęto do druku: 23.07.2015 r.