

STREFA PRZEJŚCIOWA JAKO SŁABE MIEJSCE PŁASZCZA SILOSU Z BLACHY FALISTEJ Z FARTUCHEM PODPOROWYM

EUGENIUSZ HOTAŁA, e-mail: eugeniusz.hotala@pwr.edu.pl

MATEUSZ KUŚNIEREK

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej

TOMASZ KULCZYCKI

TOMASZ WÓJCIK

TEK-Projekt sp. z o.o. sp. kom., Wrocław

Streszczenie: Stalowe silosy walcowe o płaszcach z blach falistych, wyposażone w leje, mają dość często konstrukcje wsporcze w postaci fartuchów podporowych, które są przedłużeniem ich płaszczy. Podstawowymi elementami nośnymi tych silosów są południkowe (pionowe) żebra, które przenoszą całość obciążeń południkowych. Przeciążenia tych żeber, szczególnie w tzw. strefie przejściowej, która obejmuje strefę połączenia płaszcza, leja i fartucha podporowego, są jedną z częstych przyczyn awarii silosów z blach falistych. W pracy przedstawiono zasady oceny nośności południkowych żeber płaszczy takich silosów, uwzględniając występujące w strefie przejściowej dodatkowe momenty zginające te żebra, wynikające między innymi z oddziaływania leja wysypowego na płaszczy i fartuch silosu. Wykonano analizy obliczeniowe nośności południkowych żeber w silosie o tradycyjnym sposobie podwieszenia leja do płaszcza i fartucha oraz w dwóch silosach o innowacyjnych konstrukcjach podparcia leja z częściowym połączeniem z płaszczy lub też z lejem całkowicie oddylatowanym od płaszcza i fartucha silosu. Zaprezentowane innowacyjne rozwiązania powinny znacznie zwiększyć poziom bezpieczeństwa eksploatacyjnego lejowych silosów z blach falistych i istotnie zmniejszyć ryzyko awarii konstrukcji silosów.

Słowa kluczowe: silos metalowy, powłoka ortotropowa, lej silosu, imperfekcje wykonawcze, nośność graniczna, awaria silosu

1. Wprowadzenie

Stalowe silosy z blach falistych to ortotropowe konstrukcje powłokowe, które są często stosowane między innymi w przemyśle rolno-spożywczym. Są to lekkie i stosunkowo łatwe w realizacji konstrukcje, które wykonywane są jako silosy płaskodenne (bez lejów) oraz silosy lejowe, oparte na słupach lub na przedłużonej powłoce płaszcza (rys. 4a), nazywanej często fartuchem. Zarówno płaszczy jak i fartuch podporowy silosów z blachy falistej jest wyposażony w dość gęsto rozmieszczone pionowe żebra, które w ortotropowej konstrukcji walcowej powłoki przenoszą całość obciążeń południkowych (pionowych), a blacha falista tej powłoki pełni m.in. rolę sprężystego podłoża dla tych ściskanych żeber. Pionowe żebra powłok silosów z blach falistych to te elementy konstrukcyjne, których wyczerpanie nośności jest częstą przyczyną awarii silosów płaskodennych. Zasady analizy nośności tych żeber są ciągle przedmiotem badań i dyskusji [1, 2, 3, 4], a aktualne uregulowania normowe, zawarte w PN-EN 1993-4-1, są zbyt uproszczone, co wykazano m.in. w pracach [3, 4]. Przykłady awarii silosów z blach falistych, wynikających m.in. z wyczerpania nośności pionowych żeber powłok przedstawione są w między innymi pracach [5, 6, 7, 8].

W silosach lejowych opartych za pośrednictwem fartucha, czyli przedłużonej powłoki płaszcza z blachy falistej, słabym miejscem, wrażliwym na uszkodzenia i często inicjującym

awarie silosu, jest strefa przejściowa, a więc rejon połączenia płaszczu z lejem i fartuchem podporowym. Obrywanie się lejów to dość często występujące zjawisko w początkowej fazie awarii silosów z blach falistych [2, 6, 7]. W walcowych silosach z blach falistych opartych na fartuchu strefa połączenia płaszczu z fartuchem i lejem jest strefą dużych zaburzeń błonowego stanu naprężeń w walcowej powłoce płaszczu i fartucha. Parcie poziome p_h od materiału wypełniającego komorę silosu wywołuje promieniowe odkształcenia płaszczu ale tuż pod poziomem zamocowania leja w fartuchu podporowym parcie to już nie występuje, zatem nie ma też przyczyny, dla której miałyby występować promieniowe odkształcenia powłoki fartucha. W takim przypadku trzeba się liczyć z dość dużym lokalnym zginaniem walcowej powłoki płaszczu i fartucha, a przede wszystkim z lokalnym zginaniem ciągłych, pionowych żeber obu powłok walcowych. Na ogół te żebra traktowane są jako osiowo ściskane pręty na sprężystym podłożu o sztywności K . W przypadku wystąpienia lokalnych efektów zgięciowych nośność tych żeber może być bardzo łatwo przekroczona, co wykazano m.in. w pracy [8]. Zatem strefy przejściowe silosów z blach falistych są szczególnie wrażliwymi elementami konstrukcyjnymi na przeciążenia i wynikające z nich uszkodzenia, skutkującymi awariami silosów.

W związku z powyższym poszukiwane są takie rozwiązania konstrukcyjne, które pozwolą na dość skuteczną redukcję niekorzystnych efektów zaburzeń osiowego stanu obciążeń żeber płaszczu i fartuchów podporowych. W niniejszej pracy przedstawiono dwa rozwiązania konstrukcyjne, eliminujące w praktyce ten problem. Przedstawiono również zagadnienia związane z analizą nośności pionowych żeber walcowych płaszczu i fartuchów podporowych silosów z blach falistych, które to zagadnienia nie są jeszcze w dostatecznym stopniu rozwiązane i mogą również mieć wpływ na awaryjność silosów z blach falistych. Zaprezentowane w pracy wyniki analiz obliczeniowych żeber w strefie przejściowej płaszczu silosów pozwoliły na sformułowanie wniosków praktycznych w zakresie optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych w tych strefach, które można zaliczyć do tzw. słabych miejsc lejowych silosów z blach falistych z fartuchami podporowymi.

2. Nośność południkowych żeber walcowych płaszczu silosów z blachy falistej

W normie projektowania silosów PN-EN 1993-4-1 zawarte są dwie alternatywne metody wyznaczania nośności pojedynczego południkowego żebra płaszczu silosu z blachy falistej o poziomym przebiegu fal. W pierwszej metodzie pomija się sztywność poszycia (blachy falistej), traktując żebra jak pręty osiowo ściskane, których nośność wyznacza się ze wzoru:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (1)$$

Oznaczenia we wzorze (1) są zgodne z PN-EN 1993-1-1, a efektywna nośność plastyczna przekroju żebra jest pomniejszona, z uwagi na współczynnik wyboczeniowy χ , który ustala się zgodnie z tą normą jak w przypadku wyboczenia giętnego w płaszczyźnie prostopadłej do stycznej do walcowej powłoki płaszczu i przy przyjęciu krzywej niestateczności c . Długość wyboczeniową żebra należy przyjmować między sąsiednimi pierścieniami usztywniającymi.

W drugiej zaproponowanej w normie PN-EN 1993-4-1 metodzie uwzględnia się sztywność K poszycia, czyli blachy falistej płaszczu, która z reguły w bardzo dużym stopniu zwiększa nośność wyboczeniową żebra. Nośność pojedynczego żebra płaszczu wyznacza się jako wartość mniejszą zgodnie ze wzorem:

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

We wzorze (2) K jest sztywnością podłoża sprężystego, a EI_y jest sztywnością zgięciową żebra przy zginaniu z płaszczyzny stycznej do ściany płaszcza silosu (rys. 3c). Drugie wyrażenie w nawiasie stanowi efektywną nośność plastyczną przekroju. Stosowany częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_{M1} wynosi 1,1. Pierwsze wyrażenie w nawiasie we wzorze (2) pochodzi z rozwiązania następującego równania różniczkowego ściskanego pręta przegubowo-przegubowego na podłożu sprężystym:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + N \frac{d^2 y}{dx^2} + Ky = 0, \quad (3)$$

gdzie: EI – sztywność zgięciowa pręta, N – osiowa siła ściskająca, K – sztywność podłoża sprężystego, y – przemieszczenie prostopadłe do osi wybachającego się pręta ściskanego.

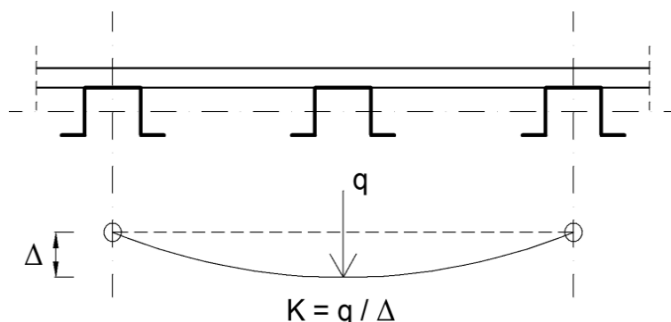
Dla pręta podpartego przegubowo na obydwu końcach zakłada się funkcję wygięcia, która spełnia wszystkie warunki brzegowe, opisaną równaniem (4):

$$y = y_0 \sin \left(\frac{n\pi x}{L} \right), \quad (4)$$

gdzie: y_0 – amplituda wygięcia, L – długość pręta, n – liczba półfal wyboczeniowych.

Rozwiązanie równania różniczkowego polega na znalezieniu minimalnej siły krytycznej N_{crit} . Po wstawieniu założonej funkcji wygięcia i jej pochodnych do równania różniczkowego oraz po odpowiednich przekształceniach otrzymujemy ostatecznie wyrażenie na siłę krytyczną:

$$N_{crit} = 2\sqrt{EI \cdot K}. \quad (5)$$

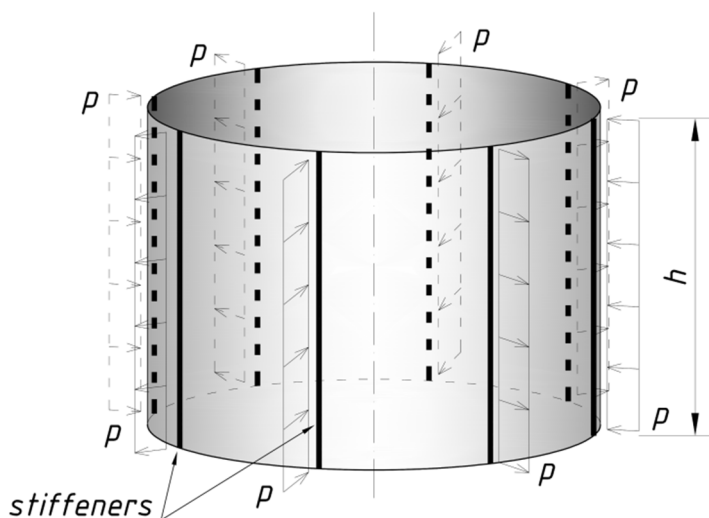


Rys. 1. Wyznaczanie sztywności K poszycia z blachy falistej wg rys. 5.5 normy PN-EN 1993-4-1

Zaproponowany w normie PN-EN 1993-4-1 sposób wyznaczania sztywności podłoża sprężystego K (rys. 1) zdaniem autorów jest zbyt uproszczony i stosowanie go prowadzi do znacznego zaniżenia realnej nośności wyboczeniowej południkowych żeber płaszczy silosów

z blach falistych. Na problem zaniżenia nośności wyboczeniowej pionowych żeber płaszczy silosów z blach falistych zwrócono uwagę w pracach [1, 3, 4, 5]. W normowym algorytmie nie uwzględnia się przede wszystkim zakrzywienia powłoki, tylko rozpatruje się blachę silosu jako niezakrzywioną (rys. 1).

W pracy [4] zaproponowano wyznaczanie sztywności K dla pełnej powłoki walcowej z blachy falistej, w której co drugie żebro wyginane jest na zewnątrz, a co drugie do wnętrza tej powłoki pod wpływem jednostkowego obciążenia p (rys. 2), które odpowiada obciążeniu q na rys. 1, a obliczone przemieszczenie Δ pozwala na wyznaczenie sztywności $K = p/\Delta$.



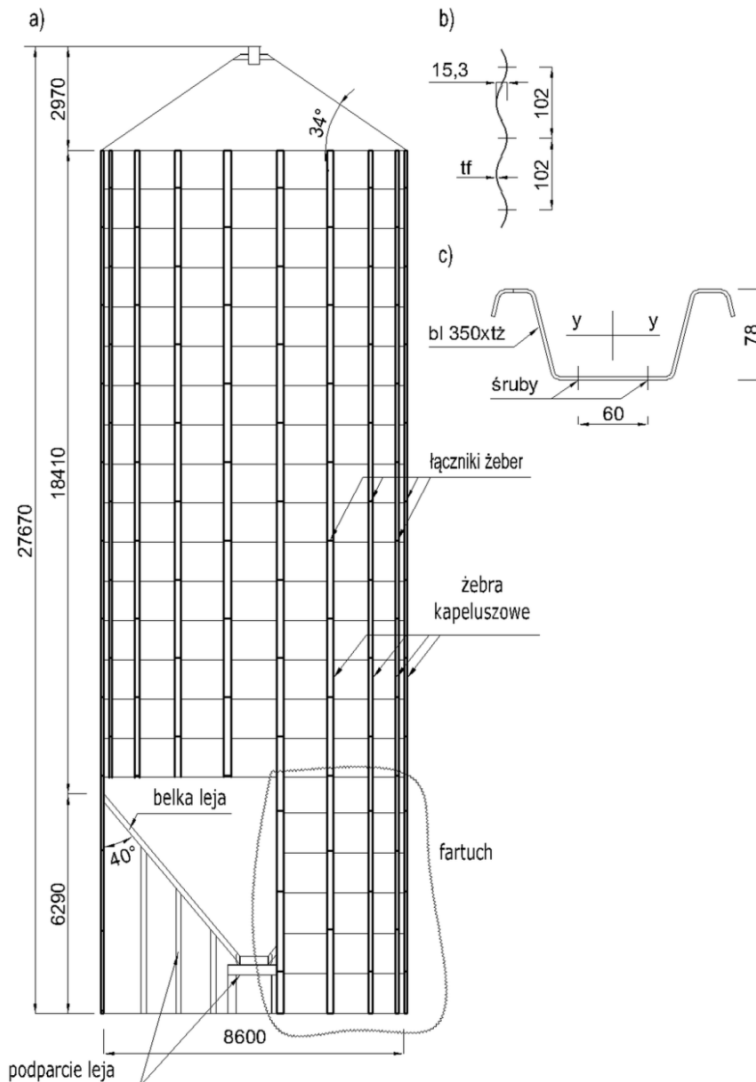
Rys. 2. Schemat do wyznaczania sztywności płaszcza silosu K wg [4]

Przykłady analiz nośności żeber na podstawie tak wyznaczonej sztywności K blachy falistej i porównanie ich z wynikami badań eksperymentalnych na modelach w skali naturalnej, przedstawione w pracy [4], wskazują na realnie większą (co najmniej o 50%) nośność wyboczeniową żeber w badanych silosach. W wielu przypadkach realnych silosów współczynnik wyboczeniowy żeber χ jest bliski wartości 1,0.

O bezpiecznej eksploatacji konstrukcji silosów z blachy falistej decyduje często prawidłowa ocena nośności południkowych żeber [1, 3, 5, 8]. Z uwagi na to, że żebra te są w praktycznym procesie projektowania traktowane najczęściej jako pręty osiowo ściskane, występujące nieoczekiwane efekty zgięciowe żeber są w stanie doprowadzić do awarii silosu [3, 8]. Efekty te występują najczęściej w strefie podparć płaskodennych silosów na fundamencie lub w rejonie styków montażowych ich żeber [3, 8]. Efekty zgięciowe, przedstawione w pracach [3, 8], mogą być przyczyną wyczerpania nośności żeber nawet bez uwzględnienia ich osiowego ściskania. W silosach lejowych opartych na słupowej konstrukcji wsporczej lub na fartuchu podporowym, będącym przedłużeniem płaszcza silosu, występują efekty zgięciowe południkowych żeber tego płaszcza, wywołane rozszerzalnością promieniową płaszcza wskutek parcia bocznego materiału wypełniającego silos oraz brakiem takiej rozszerzalności i także parcia w strefie podlejowej fartucha. Zamocowanie leja do fartucha i płaszcza silosu wpływa na wystąpienie poziomego oddziaływania leja na płaszcz i fartuch, a więc i na dodatkowe momenty zginające żebra. Ta strefa silosu, nazywana strefą przejściową, znajduje się przeważnie w bardzo złożonym stanie wyłączenia i może w niej być zainicjowana poważna awaria silosu.

3. Analizowane konstrukcje stref przejściowych w silosach z fartuchami podporowymi

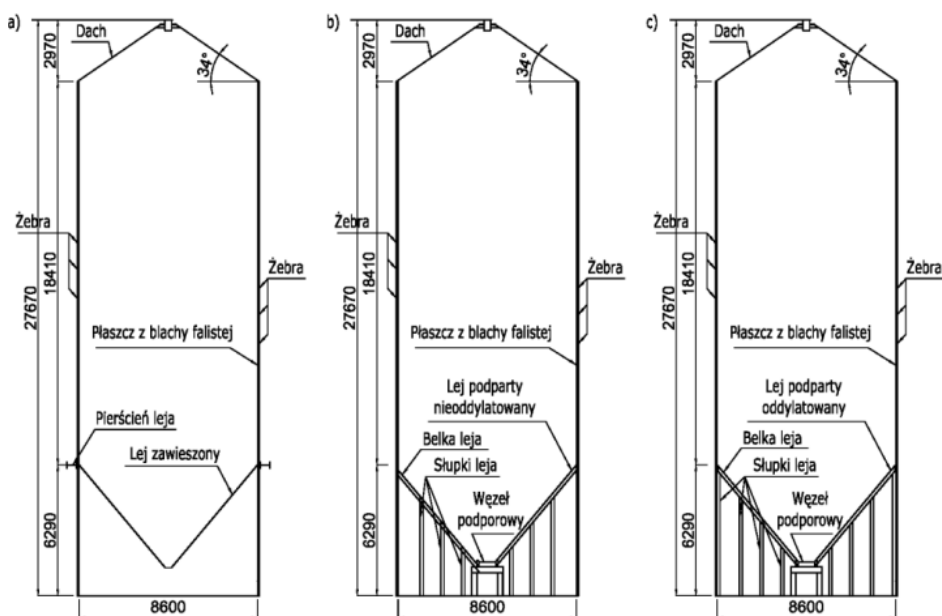
W ramach jednego ze zrealizowanych z udziałem autorów pracy projektów badawczych w pewnej firmie przemysłowej opracowano innowacyjną wersję silosu lejowego o średnicy $d = 8,6$ m i poddano ją analizom numerycznym, a także zaawansowanym badaniom eksperymentalnym, których niektóre wyniki przedstawione są m.in. w [4].



Rys. 3. Silos lejowy z cylindrycznym płaszczem podpartym za pomocą fartucha: a) geometria silosu, b) geometria blachy falistej c) przekrój poprzeczny żebra

W badanym rozwiązaniu konstrukcyjnym zrezygnowano z tradycyjnego podparcia komory na słupach stalowych i zastąpiono je fartuchem, stanowiącym przedłużenie płaszcza, a konstrukcję leja podparto całkowicie na niezależnych słupach. Wybrane szczegóły tego rozwiązania przedstawiono na rysunku 3. Płaszcz i fartuch silosu składa się z 22 obwodowych

carg o powtarzalnej wysokości $h_{carg} = 1,122$ m. Podporowa część płaszczu, zwana fartuchem, złożona jest z 6 carg. Grubość zastosowanych blach w poszczególnych cargach zależy od strefy silosu i wynosi od 0,75 mm do 1,2 mm. Geometrię zastosowanej blachy falistej przedstawiono na rysunku 3b. Do przeniesienia południkowych sił ściskających płaszcz zastosowano 18 południkowych żeber kapeluszowych (rys. 3c), w obwodowym rozstawie co 1,5 m, połączonych przegubowo z fundamentem. Żebra składają się z kilku odcinków łączonych w sposób ciągły. W zależności od wartości sił ściskających grubość poszczególnych odcinków żeber t_z wynosi od 2 mm w części poddachowej do 6 mm w dolnej strefie, stanowiącej fartuch podporowy. Żebra łączą się z płaszczem za pomocą śrub o wysokiej wytrzymałości. Dach silosu tworzy samonośna uźebrowana powłoka stożkowa o kącie nachylenia tworzącej 34° . Zastosowano zarówno centryczne napełnianie jak i centryczne opróżnianie silosu. Płaszcz silosu oraz konstrukcję leja zaprojektowano ze stali HX380 o granicy plastyczności $f_{yk} = 380$ MPa. Pojemność użytkowa silosu wynosi $V = 1185$ m³ i służy on do magazynowania pszenicy lub kukurydzy.



Rys. 4. Analizowane konstrukcje strefy przejściowej silosu: a) tradycyjne połączenie leja z płaszczem, b) dodatkowe podparcie leja na słupkach, c) oddzielenie leja od płaszczu i podparcie go na słupkach

Typowym rozwiązaniem, stosowanym dotychczas dość powszechnie, było podwieszenie leja bezpośrednio do płaszczu i przekazywanie obciążeń z leja na fartuch podporowy bez dodatkowych słupów podpierających lej (rys. 4a). Zastosowane w praktyce innowacyjne rozwiązanie (rys. 4b) jest jednym z dwóch proponowanych rozwiązań, różniących się od rozwiązań tradycyjnych (rys. 4a), gdyż lej jest podparty na własnych słupkach podporowych poprzez promieniowe belki leja, niezależnie od fartucha. Drugim innowacyjnym rozwiązaniem jest całkowite oddzielenie leja od płaszczu i fartucha podporowego przy zastosowaniu niezależnego podparcia leja zgodnie z rysunkiem 4c. W tym rozwiązaniu lej nie wywiera żadnych oddziaływań na płaszcz i fartuch podporowy, co eliminuje w praktyce momenty zginające żebra w strefie przejściowej. Podobne efekty redukcji momentów zginających żebra uzyskano również w przypadku zastosowanego w praktyce rozwiązania, przedstawionego na

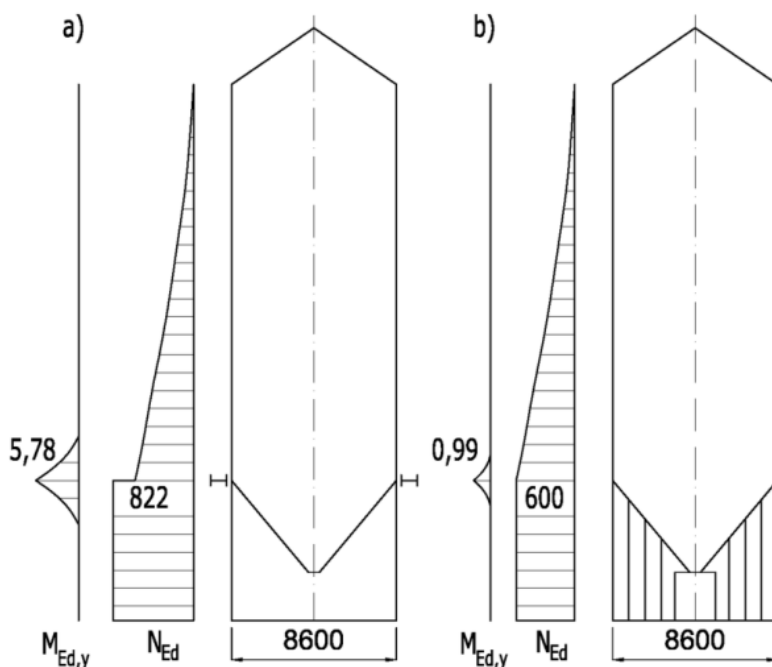
rys. 4b. W obu innowacyjnych przypadkach konstrukcyjnych południkowe obciążenie fartucha podporowego pochodzi wyłącznie od płaszcza silosu, a więc nie ma potrzeby stosować w nim żeber o większych przekrojach niż w płaszczu powyżej leja. Dodatkowe (rys. 4b) lub niezależne (rys. 4c) podparcie leja i oddylatowanie go od płaszcza i fartucha silosu stanowi istotny czynnik zwiększający bezpieczeństwo silosów z blach falistych, wyposażonych w leje. Jak zauważono w pracach [2, 6, 7] w większości awarii takich silosów na początku takich zdarzeń dochodziło do oberwania się lejów. W rozwiązaniach, zaproponowanych na rys. 4b i 4c lej jest podparty bezpośrednio na słupowej konstrukcji wsporczej i jego oberwanie jest przez to w praktyce mało realne. Podparcie leja również w strefie wierzchołkowej przy otworze wysypowym (rys. 3), wyposażonej w pierścień wieńczący belki promieniowe leja oraz zastosowanie pośrednich słupków podpierających lej poprzez te belki, skutecznie wyeliminowało promieniowe, poziome oddziaływanie leja na płaszcz i fartuch podporowy. W obu przypadkach nowych rozwiązań konstrukcyjnych (podparcie leja – rys. 4b, 4c) wyeliminowano także przekazywanie przez lej pionowych oddziaływań na konstrukcje podporową (fartuch) silosu.

Zastosowanie niezależnych słupków podporowych w leju nie wpływa znacząco na zwiększenie zużycia stali, gdyż zmniejszają się siły południkowe w fartuchu podporowym (por. p. 4), co pozwala na zmniejszenie przekroju żeber, a nawet grubości blachy falistej w fartuchu.

4. Analizy wyężenia żeber płaszcza w strefie przejściowej silosu

Południkowe żebra płaszcza i fartucha podporowego silosów z blach falistych projektowane są w praktyce jako pręty osiowo ściskane na podłożu sprężystym, którym jest walcowa powłoka płaszcza lub fartucha podporowego. Nawet niezbyt duże lokalne efekty zaburzenia osiowego obciążenia żeber, wywołujące zginanie, mogą doprowadzić do wyczerpania ich nośności, co wykazano m.in. w pracach [3, 8]. W pracach tych wykazano, że jednym z podstawowych warunków zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacji konstrukcji silosów z blach falistych i zmniejszenia ryzyka awarii jest eliminacja lokalnych efektów zgięciowych w żebrach południkowych (pionowych). Lokalne momenty zginające w żebrach mogą wystąpić w strefie nieprzesuw nego podparcia na fundamencie, w stykach montażowych żeber [8] oraz w strefie przejściowej, która jest przedmiotem analiz w niniejszej pracy. Te lokalne momenty zginające powodują znaczny wzrost wyężenia żeber, projektowanych jako osiowo ściskane pręty. Ważna jest więc świadomość projektantów, że zwykłe zawieszenie leja na fartuchu podporowym (rys. 4a) wywołuje te bardzo niebezpieczne efekty zgięciowe. Zaproponowane nowe rozwiązanie podparcia leja niezależne od fartucha podporowego (rys. 4b i 4c) pozwala na prawie całkowite wyeliminowanie zginania żeber fartucha i płaszcza w strefie przejściowej silosu, co wpływa na zmniejszenia ryzyka nieprzewidzianej awarii silosu.

Aby wykazać efekty zwiększenia bezpieczeństwa konstrukcji lejowych silosów z blach falistych z fartuchem podporowym wykonano stosowne analizy numeryczne MES konstrukcji silosu przedstawionego na rys. 3, przy czym oddzielnie analizowano konstrukcje z zamocowaniem leja wg rys. 4a i 4b, a także 4c. Siły wewnętrzne w pojedynczym żebrze silosu, w tym obliczeniowe momenty zginające $M_{Ed,y}$, występujące w strefie przejściowej, przedstawiono na rys. 5. Obliczenia wykonano uwzględniając jedynie obciążenia od materiału wypełniającego silos, którym była pszenica, a podstawowe właściwości materiału sypkiego, niezbędne do obliczeń obciążeń płaszcza i leja silosu wyznaczone były wg PN-EN 1991-4.



Rys. 5. Obliczeniowe lokalne momenty zginające $M_{Ed,y}$ w strefie przejściowej silosu i siły osiowe N_{Ed} w pojedynczym żebrze: a) mocowanie leja wg rys. 4a, b) podparcie leja wg rys. 4b

Przekroje żebrowe w strefie przejściowej i w fartuchu podporowym dobierano tak, aby wykorzystanie nośności ich przekrojów, z uwzględnieniem lokalnego momentu zginającego $M_{Ed,y}$, było bliskie 100%. Na tym etapie analiz nie wyznaczano współczynnika wyboczeniowego żebrowych χ , gdyż miałyby on taki sam wpływ na wykorzystanie nośności w każdym z analizowanych rozwiązań konstrukcyjnych strefy przejściowej, pokazanych na rys. 4. Analizy nośności przekrojów żebrowych miały na celu jedynie porównanie skuteczności redukcji wpływu momentu zginającego żebra w przypadku różnych rozwiązań konstrukcyjnych podparcia leja silosu z fartuchem podporowym. Realny współczynnik wyboczeniowy żebrowych χ , uwzględniający zastosowane blachy faliste i wyznaczony wg metody zaproponowanej w pracy [4], był bliski wartości 1,0. Stopień wykorzystania nośności S przekrojów żebrowych płaszcza i fartucha w strefie przejściowej wyznaczano wg zależności (6):

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed,y}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} = S, \quad (6)$$

a zastosowane w tym wzorze pozostałe oznaczenia są zgodne z PN-EN 1993-1-1.

W tabelicy 1 przedstawiono wyniki analiz stopnia wykorzystania nośności S przekrojów żebrowych płaszcza i fartucha w strefie przejściowej silosu o konstrukcji według rys. 4, stosując zależność (6). Obliczeniowe wartości sił wewnętrznych N_{Ed} i $M_{Ed,y}$ w żebrach, obliczone numerycznie od wypełnienia silosu pszenicą, przedstawiono na rys. 5. W przypadku oddziałowania podpartego niezależnie leja (rys. 4c) otrzymano praktycznie identyczne, jak w przypadku rys. 4b, wartości sił wewnętrznych w żebrze w strefie przejściowej: $N_{Ed} = 600$ kN,

$M_{Ed,y} = 0,97$ kNm. Nośności obliczeniowe przekrojów na ściskanie i zginanie, które występują w mianownikach we wzorze (6), oznaczono w tablicy nr 1 jako $N_{c,Rd,eff}$ oraz $M_{c,Rd,yeff}$.

Tablica 1. Siły wewnętrzne i stopień wykorzystania nośności żeber w strefie przejściowej silosu

Mocowanie leja	Przekrój żebra (rys. 3c)	N_{Ed} [kN]	$M_{Ed,y}$ [kNm]	$N_{c,Rd,eff}$ [kN]	$M_{c,Rd,yeff}$ [kNm]	Stopień wykorzystania nośności S wg zal. (6)
Rys. 4a	350×9	822	5,78	1162,8	26,4	0,926
Rys. 4b	350×6	600	0,99	775,2	17,6	0,830
Rys. 4c	350×6	600	0,97	775,2	17,6	0,829

W przypadku podparcia leja na własnych, niezależnych słupkach podporowych (rys. 4b i 4c) lokalny moment zginający żebra $M_{Ed,y}$ w strefie przejściowej zmniejsza się prawie 6-krotnie w stosunku do momentu zginającego, występującego w przypadku tradycyjnego zamocowania leja do fartucha podporowego (rys. 4a). Ta redukcja lokalnego momentu zginającego jest ważnym czynnikiem wpływającym na zwiększenie bezpieczeństwa konstrukcji silosu i ponadto pozwala na znaczne zmniejszenie przekroju żeber fartucha i płaszcza (tab. 1 – rys. 4b i 4c), co prawie całkowicie równoważy dodatkowe zużycie stali, wynikające z zastosowania niezależnych słupków podporowych leja.

Wyniki analiz nośności żeber płaszcza i fartucha podporowego w silosie wyposażonym w lej, przedstawione w tab. 1, pokazują wyraźnie na wzrost bezpieczeństwa eksploatacji takich silosów w przypadku zastosowania innowacyjnych konstrukcji w postaci niezależnych podpór stożkowego leja, w tym podparcia go w strefie wierzchołkowej (rys. 3, 4b i 4c).

5. Wnioski końcowe

Strefy przejściowe stalowych z silosów z blach falistych, wyposażonych w stożkowy lej i walcowy fartuch są słabymi miejscami tych konstrukcji z uwagi na możliwość występowania w pionowych żebrach lokalnych i znacznych momentów zginających. Dość często w praktyce projektowej te momenty zginające nie są wyznaczane i uwzględniane w analizach nośności żeber, gdyż powszechnie uważa się południkowe żebra płaszczy i fartuchów silosów za pręty osiowo ściskane. Wiele awarii silosów z blach falistych ma swoje przyczyny w przeciążeniu żeber w strefach przejściowych [1, 6, 7, 8], stąd zaprezentowane w pracy wyniki analiz nośności żeber w strefach przejściowych mogą pozwolić na właściwą ocenę bezpieczeństwa konstrukcji silosów przez projektantów.

Zaprezentowane innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne, polegające na zastosowaniu niezależnych podpór leja (rys. 3, 4b, 4c), szczególnie w strefie wierzchołkowej, mogą znacznie zmniejszyć ryzyko awarii silosów z blach falistych, wyposażonych w leje i fartuchy podporowe. Nie wymagają one zaawansowanych analiz numerycznych sił wewnętrznych w strefie przejściowej silosu, gdyż niezależne podparcie leja i ewentualne oddylatowanie go od fartucha podporowego redukuje prawie całkowicie lokalne zginanie pionowych żeber płaszcza i fartucha silosu. Rozwiązania te zostały już z powodzeniem zastosowane w praktyce.

Literatura

1. Błazejowski P., Marcinowski J.: Nośność wyboeczeniowa żeber wzmacniających ściany stalowego silosu na zboże. Budownictwo i Architektura, nr 12(2)/2013, s. 189–196.
2. Hotała E.: Stalowe silosy na produkty rolne – rozwiązania konstrukcyjne, analizy nośności, trwałość, awarie. Politechnika Lubelska, Lublin 2013, s. 231–243.

3. Hotała E., Kuśnierek M.: Nośność południkowych żebrowa płaszczu silosów z blachy falistej. *Materiały Budowlane*, nr 5/2016, s. 93–94.
4. Hotała E., Skotny Ł., Kuśnierek M., Boniecka J.: Experimental investigations on the resistance of vertical stiffeners of steel silos shells made of corrugated sheets. *Recent Progress In Steel and Composite Structures* – Giżejowski et. al. (Eds). 2016 Taylor&Francis Group, London. s. 186–187.
5. 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.
6. Biegus A., Hotała E.: Katastrofa stalowego silosu na pasze. *Materiały XXI Konferencji Naukowo-Technicznej „Awary Budowlane”*, Szczecin-Międzyzdroje, 20–23 maja 2003, s. 417–424.
7. Hotała E.: Awaryjność silosów z blachy falistej. *Materiały Budowlane*, nr 2/2006, s. 37–39.
8. Hotała E., Kuśnierek Ł., Skotny Ł., Boniecka J.: Wadliwe połączenia żebrowa przyczyną awarii silosów o płaszczach z blach falistych. *Materiały XXVII Konferencji Naukowo-Technicznej „Awary Budowlane”*, Szczecin-Międzyzdroje, 20–23 maja 2015, s. 501–508.

SKIN OF THE SILO MADE OF CORRUGATED SHEETS TO THE SUPPORT FUNNEL TRANSITION ZONE AS A WEAK PLACE OF THE STRUCTURE

Abstract: Steel cylindrical silos made of corrugated sheets that are equipped by funnels have often the bearing structures arranged in the shape of support skins which constitute their continuation. Basic structural elements of the silos are the meridional (vertical) ribs transmitting the entire meridional actions. Overloading of these ribs, particularly at transition zone, that consists of the connection portion of the skin, funnel and the support apron, is one of the frequent cases of the failures of silos made of corrugated sheets. The paper presents rules of evaluation of the resistance of the meridional ribs in such silos subjected additionally to bending moments caused by, among others, the action of the discharging funnel on the skin and silo apron in the transition zone. Numerical analyses of the resistances of the meridional ribs in the silo with the funnel classically suspended to the both skin and apron have been carried out in comparison with two silos. For these silos, the innovative support of the funnel, partially connected with the skin or with the funnel entirely separated out from the skin and the silo apron (dilatation) were proposed. The innovative solutions presented here should increase the level of operation safety of the studied silos and reduce the risk of a failure of the silo structure.

Keywords: steel silo, orthotropic skin, silo funnel, execution imperfection, load-bearing capacity, failure of silo