

Rozerwanie blachy cargi stalowego silosu na zboże. Studium przypadku

JAKUB MARCINOWSKI^{1,*}, VOLODYMYR SAKHAROV¹

¹Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budownictwa

Streszczenie: Przedmiotem analiz przedstawionych w pracy jest stalowy silos na zboże o pojemności 934 m³ użytkowany zgodnie z przeznaczeniem przez trzy kolejne lata. Silos jest wyposażony w lej wysypowy, a jego ściany zostały wykonane z blachy falistej wzmocnionej zewnętrznymi żebrami z kształtowników zinnogiętych. Do rozerwania blachy cargi doszło podczas początkowej fazy operacji opróżniania silosu wypełnionego pszenicą. Pracownik obsługujący system przesypywania ziarna dostrzegł strumień wysypującego się zboża w miejscu rozerwania blachy drugiej cargi powyżej pierścienia leja wysypowego. Wstrzymanie operacji przesypywania skutkowało zatrzymaniem procesu postępującego rozrywania blachy na krawędzi obudowy drzwi włazowych. W pracy przedstawiono szczegółowe rozważania skoncentrowane na ustaleniu przyczyny wystąpienia awarii. Badania materiałowe, obliczenia analityczne wykonane z wykorzystaniem obowiązujących zapisów normowych oraz symulacje numeryczne wykonane z pomocą systemu Abaqus pozwoliły wskazać najbardziej prawdopodobne mechanizmy rozerwania blachy.

Słowa kluczowe: silos stalowy, blacha profilowana, rozerwanie blachy, badania materiałowe, obliczenia analityczne, symulacje numeryczne

1. Wprowadzenie

Stalowe silosy na zboże na trwałe wpisały się w krajobraz współczesnej wsi i stały się wręcz konieczne w gospodarstwach specjalizujących się w uprawie zbóż. Budowane są relatywnie niewielkie silosy na paszę dla drobiu (tzw. biny o pojemności kilku m³) po prawdziwe giganty o pojemności dochodzącej do 30 tys. m³, zgrupowane w baterie silosów, którym towarzyszą zazwyczaj silosy buforowe i suszarnie. Zespół takich urządzeń tworzy kompletną bazę suszarniczo-magazynową.

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 płaszcza (cargi) jak i grubości blach, z których są wykonywane zinnogięte przekroje żeber wzmacniających płaszczy z zewnątrz. Minimalizacja grubości elementów powinna być poparta szczegółowymi analizami potwierdzającymi poprawność rozwiązań konstrukcyjnych. Dotyczy to nie tylko żeber przenoszących siły

*Autor do korespondencji: j.marcinowski@ib.uz.zgora.pl

ściskające, lecz także ścian z blach profilowanych narażonych na zniszczenie w efekcie działania obwodowych sił rozciągających.

Częstość awarii silosów sprawiła, że konstrukcje te stały się obiektem zainteresowania wielu autorów krajowych i zagranicznych. W wykazie publikacji przywołano prace krajowych autorów z ostatnich 10-ciu lat. (por. [1–13]). Większość z nich powstała na kanwie zaistniałych awarii silosów. Główne przyczyny awarii to błędy projektowe, błędy wykonawcze i błędy eksploatacyjne. Przebieg awarii ma rzadko gwałtowny charakter (wyjątkiem jest urwanie leja wysypowego) i dlatego awarie silosów nie pociągają za sobą ofiar ludzkich. Straty materialne są ogromne z racji niemałej ceny samego silosu i wysokiej ceny składowanego materiału.

W prezentowanej pracy zamieszczono analizy, których celem było ustalenie przyczyn rozerwania blachy ściany silosu. Obliczenia wykonane za pomocą wzorów normowych oraz symulacje numeryczne potwierdziły przekroczenie nośności w blasze dolnej cergi w sąsiedztwie drzwi wjazdowych.

2. Opis analizowanego silosu

Analizowany silos jest jednym z siedmiu silosów lejowych składających się na baterię zlokalizowaną na terenie gospodarstwa specjalizującego się w uprawie zbóż. Część cylindryczna silosu ma średnicę 8,16 m i składa się na nią 16 cergi o wysokości 1000 mm (rozstaw linii łączenia) każda. Lej ma pochYLENIE 40 stopni, a jego pierścień opiera się na 18 słupach. Ich przedłużeniem jest 18 żeber wzmacniających część cylindryczną silosu (por rys. 1). Rozstaw obwodowy żeber wynosi 1425 mm. Grubość blach wszystkich cergi jest stała i równa $t = 1,0$ mm. Blachy łączono śrubami M8 klasy 8.8 z trzpieniem o średnicy równej 9 mm. Średnica otworów $f = 9,5$ mm.



Rys. 1. Widok dolnej części uszkodzonego silosu.

Ściany silosu wykonano z blachy falistej z poziomym układem fal. Blachy ścian silosu zostały zewnętrznie wzmocnione zimnogiętymi kształtownikami (żebami) o przekroju w kształcie wywiniętego ceownika. Dach silosu ma kształt ściętego stożka, a jego pochYLENIE

wynosi 30 stopni. Blachy poszycia dachu spoczywają na ruszcie z kształtowników zimnogiętych. Część dolną silosu stanowi lej z blach gładkich. Ma on kształt stożka o nachyleniu ścian bocznych pod kątem 40 stopni. Słupy wsporcze posadowiono na żelbetowej płycie fundamentowej o kształcie ośmioboku foremnego wpisanego w koło o promieniu 4,87 m. Pojemność silosu jest równa 934 m³.

Do rozerwania blachy ściany silosu doszło podczas przesypywania pszenicy wypełniającej silos do silosu sąsiedniego. Operacja przesypywania zboża została rozpoczęta w fazie całkowitego wypełnienia silosu pszenicą. Blacha falista ściany uległa rozerwaniu krótko po rozpoczęciu przesypywania. Według relacji pracowników obsługujących silos, pojawił się wąski strumień wysypującego się zboża z drugiej (licząc od dołu) cargi części walcowej tuż obok drzwi wjazdowych (por. rys. 1).

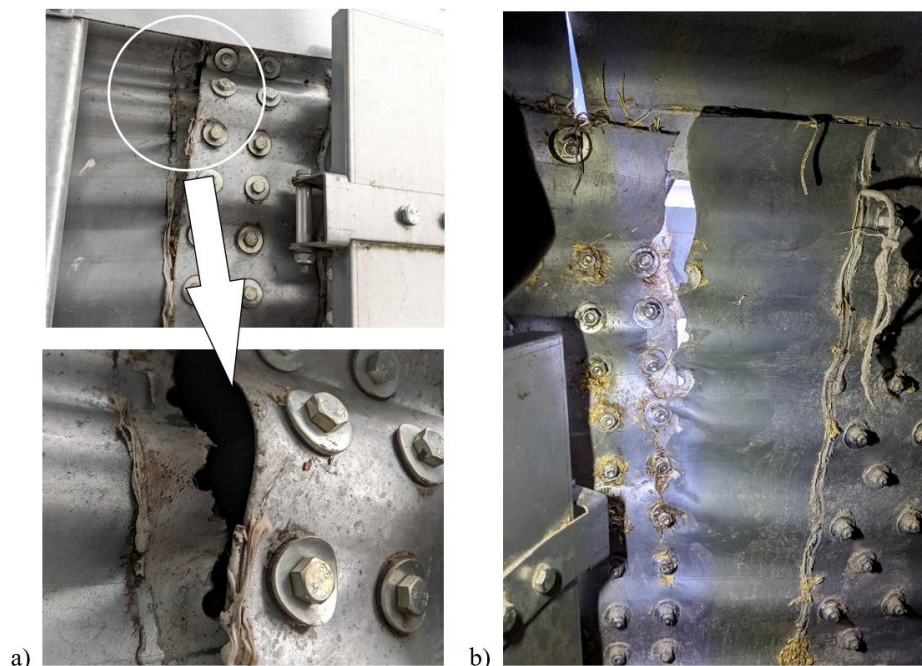
Pracownicy obsługujący silos wstrzymali przesypywanie i prowizorycznie zaczęli zamykać otwór wciskając w miejsce rozwarcia sztywny materiał tekstylny.

Powiadomieni o zdarzeniu pracownicy firmy, która wykonała silos, zalecili wstrzymanie dalszego opróżniania i wzmocnili ścianę silosu w sąsiedztwie rozerwanej cargi czterema opaskami z płaskowników, łączonych śrubami z półkami żeber ściennych (por. rys. 1).

W uzgodnieniu z wykonawcą silosu, dalsze opróżnianie odbyło się techniką odsysania ziaren pszenicy od góry. Tym sposobem opróżniono około połowy objętości silosu. Pozostałe zboże opróżniono od dołu, za pomocą istniejących urządzeń do opróżniania silosu.

Miejsce rozerwania cargi pokazano na rys. 2.

Wszystkie śruby wykorzystane do łączenia poszczególnych elementów silosu były cehowane. Żadna ze śrub nie uległa zniszczeniu (por. rys. 2).

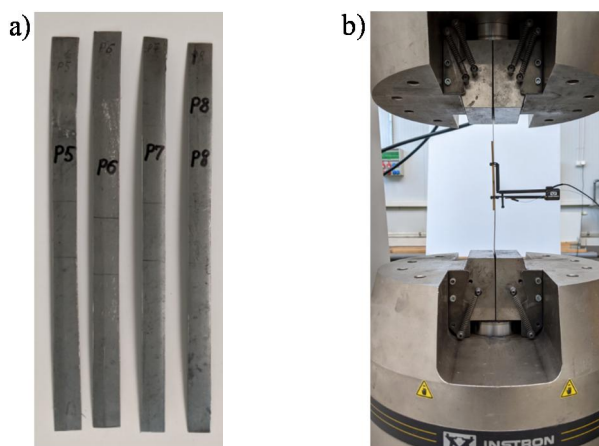


Rys. 2. Miejsce rozerwania blachy cargi widziane od zewnątrz a) i od środka b).

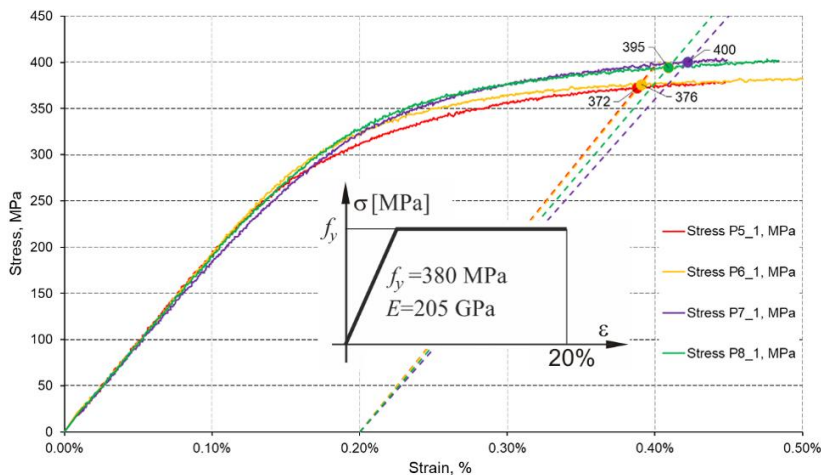
Zaobserwowany mechanizm zniszczenia wskazał możliwe kierunki badania przyczyny awarii. Szczególną uwagę skoncentrowano na nośności blach dolnych carg w pobliżu miejsc ich łączenia zakładkowymi połączeniami śrubowymi.

3. Badania materiałowe

Badania materiałowe wykonano na próbkach wyciętych z fragmentu blachy ściennej, która zachowała się z okresu montażu silosu w 2018 roku. Próbki przygotowane do badań oraz próbkę w trakcie statycznej próby rozciągania pokazano na rys. 3. Odształcenia mierzono na bazie 50 mm za pomocą ekstensometru (por. rys. 3.b). Charakterystyki $\sigma(\epsilon)$ pokazano na rys. 4. Na podstawie tych wykresów przyjęto: $f_y = 380$ MPa, $f_u = 400$ MPa, $E = 205$ GPa. Do analiz numerycznych przyjęto uproszczony model materiałowy pokazany na rys. 4.



Rys. 3. Próbki do badań materiałowych a) oraz próbka w trakcie badania b).



Rys. 4. Wyniki badań materiałowych czterech próbek i przyjęty model materiałowy.

4. Obliczenia wytrzymałościowe

4.1. Zestawienie obciążeń

Sposób obciążenia ścian silosu definiuje norma [14]. Rozważany silos ma pojemność 934 m^3 . Zgodnie z klasyfikacją podaną w p. 2.5 normy [14], mamy do czynienia z silosem klasy oceny oddziaływań AAC2.

Stosunek wysokości części cylindrycznej do średnicy silosu: $h_c/d_c = 16/8,16 = 1,96$.

Jest to wartość nieznacznie mniejsza od 2. Przyjęto, zgodnie z klasyfikacją podaną w p. 5.1 normy PN-EN 1991-4:2006, że mamy do czynienia z silosem smukłym.

Obciążenia w stanie napełnienia określono na podstawie zapisów p. 5.2.1.1 normy [14].

Wartości parcia poziomego p_{hf} , tarcia powierzchniowego o ścianę p_{wf} i parcia pionowego p_{vf} na dowolnej głębokości z po napełnieniu lub podczas składowania określono za pomocą wzorów (5.1) do (5.6) z normy [14].

Z tablicy E.1 z normy [14] przyjęto:

$g = g_u = 9 \text{ kN/m}^3$ – wartość charakterystyczna ciężaru objętościowego pszenicy z tabl. E.1 (górną wartość).

Zgodnie z tablicą 4.1 z normy [14] mamy do czynienia z przypadkiem ściany kategorii D4. Współczynnik tarcia dla takiej ściany określa się ze wzoru (D.1) z załącznika D normy [14]:

$$\mu_{eff} = (1 - a_w) \cdot tg\phi_i + a_w\mu_w, \quad (1)$$

gdzie:

- ϕ_i – kąt tarcia wewnętrznego materiału składowanego,
- μ_w – współczynnik tarcia o płaską blachę (przypadek ściany D2),
- a_w – współczynnik określany w sposób wyjaśniony w normie.

Na podstawie danych z tabl. E1 z normy [14] przyjęto współczynnik tarcia (dolna wartość): $\mu_w = \mu_{wm}/a_u = 0,38/1,16 = 0,3276$.

Dla pszenicy (tabl. E.1 z Normy [14]) kąt tarcia wewnętrznego (dolna wartość): $\phi_i = \phi_{im}/a_\phi = 30/1,12 = 26,79^\circ$.

Dla blachy profilowanej sinusoidalnie można przyjąć (por. p. D.2 (3) normy [14]): $a_w = 0,2$. Efektywny współczynnik tarcia:

$$\mu_{eff} = (1 - a_w) \cdot tg\phi_i + a_w\mu_w = (1 - 0,2) \cdot tg26,79 + 0,2 \cdot 0,3276 = 0,4694.$$

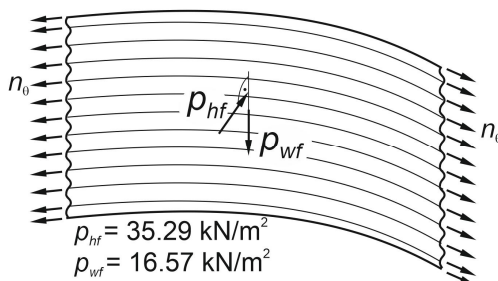
Wartość ilorazu parcia bocznego określono na podstawie danych z tabl. E.1 normy [14] (górną wartość): $K = K_m \cdot a_K = 0,54 \cdot 1,11 = 0,5994$.

Wielkości geometryczne wykorzystane w obliczeniach:

$$A = \pi \frac{d_c^2}{4} = \pi \frac{8,16^2}{4} = 52,30 \text{ m}^2 \text{ – pole przekroju poprzecznego silosu,}$$

$$U = \pi d_c = \pi \cdot 8,16 = 25,64 \text{ m – obwód przekroju poprzecznego silosu.}$$

Na rys. 5 przedstawiono wyliczone wartości parcia materiału zasypowego na ścianę silosu w stanie napełnienia, na poziomie drugiej cangi. Są to wartości charakterystyczne obciążeń. Aby otrzymać wartości obliczeniowe należy podane wartości pomnożyć przez współczynnik $g = 1,5$.



Rys. 5. Wartości charakterystyczne obciążeń od materiału zasypowego.

Obciążenia w stanie opróżniania można otrzymać mnożąc otrzymane wartości obciążeń przez współczynniki zwiększające przewidziane normą [14]. W przypadku silosów smukłych i spełniających kryteria klasy oceny oddziaływań AAC2, wartości tych współczynników wynoszą (por. p. 5.2.2.1 normy [14]):

- dla obciążeń poziomych: $C_h = 1,15$,
- dla obciążeń stycznych działających na ścianę: $C_w = 1,10$.

4.2. Nośność plastyczna cargi

Wartość obliczeniowa siły obwodowej w stanie napełnienia w rozważanej cardze:

$$n_{\theta k} = p_{hf} \cdot R \cdot \gamma_f = 35,29 \cdot 4,08 \cdot 1,5 = 215,97 \text{ kN/m} \quad (2)$$

Tę obwodową siłę rozciągającą musi przenieść carga o fali: $L = 100 \text{ mm}$, $d = 15 \text{ mm}$ i $t = 1 \text{ mm}$ (por. rys. 6).

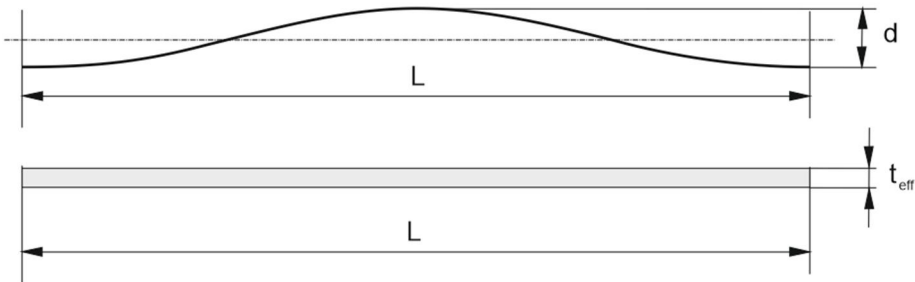
Długość pojedynczej fali sinusoidalnej:

$$L_f = L + \frac{\pi^2 d^2}{4L} - \frac{3\pi^4 d^4}{64L^3} = 105,32 \text{ mm}. \quad (3)$$

Efektywny przekrój przenoszący siłę obwodową:

$$A_{eff} = L_f \cdot t = 105,32 \cdot 1,0 = 105,32 \text{ mm}^2, \quad (4)$$

$$t_{eff} = \frac{A_{eff}}{L} = \frac{105,32}{100} = 1,053 \text{ mm}. \quad (5)$$



Rys. 6. Długość fali w analizowanej blaszce falistej.

Naprężenia obwodowe w cardze:

$$\sigma_{\theta d} = \frac{n_{\theta d}}{t_{eff}} = \frac{215,97 \cdot 10^3}{0,001053} = 205,06 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 205,06 \text{ MPa} < f_y = 380 \text{ MPa}. \quad (6)$$

Warunek nośności przekroju brutto jest spełniony.

4.3. Nośność przekroju osłabionego otworami

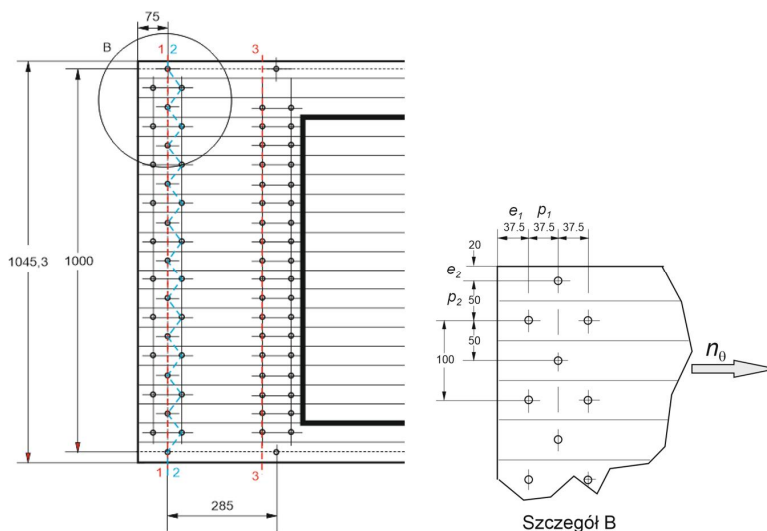
Rozstaw otworów pod śruby łączące cargę na obwodzie pokazano na rys. 7. Średnica otworów: $d_0 = 9,5 \text{ mm}$.

Przekrój netto 3-3, w pobliżu drzwi wjazdowych:

$$A_{net} = A_{br} - 18 \cdot d_0 \cdot t = A_{br} - 18 \cdot 9,5 \cdot 1,0 = A_{br} - 171 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

Nośność przekroju 3-3 netto obliczamy ze wzoru (6.7) z normy [15]:

$$N_{net,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (8)$$



Rys. 7. Osłabienie blachy otworami.

Wytrzymałość na rozciąganie: $f_u = 400$ MPa, częściowy współczynnik bezpieczeństwa: $\gamma_{M2} = 1,25$, (norma [15], p. 6.1).

$$A_{br} = 1,0 \cdot (10 \cdot L_f + 50) = 1,0(10 \cdot 105,32 + 50) = 1103,21 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

$$A_{net} = A_{br} - 171 = 1103,21 - 171 = 932,21 \text{ mm}^2. \quad (10)$$

Nośność obliczeniowa przekroju osłabionego otworami:

$$N_{net,Rd} = \frac{0,9 \cdot 932,21 \cdot 400}{1,25} = 268475 \text{ N} = 268,48 \text{ kN}. \quad (11)$$

Siła rozciągająca przypadająca na jedną cargę:

$$N_{\theta,d} = n_{\theta,d} \cdot 1,045 = 215,97 \cdot 1,045 = 225,69 \text{ kN}. \quad (12)$$

Norma [16] przewiduje redukcję nośności przekroju netto ze względu na liczbę śrub w połączeniu. Nośność przekroju netto jest określona wzorem (por. tabl. 8.4 z normy [16]):

$$F_{n,Rd} = [1 + 3 \cdot r \cdot \left(\frac{d_0}{u} - 0,3\right)] \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (13)$$

gdzie:

r – stosunek liczby śrub w rozważanym przekroju do całkowitej liczby śrub w połączeniu,

$u = 2 e_2$ ale $u \leq p_2$.

W analizowanym połączeniu: $d_0 = 9,5$ mm, $e_2 = 120$ mm, $p_2 = 50$ mm, $u = 2 e_2 = 240$ mm $> p_2 = 50$ mm, przyjęto zatem $u = p_2 = 50$ mm.

W przekroju 3-3: $r = \frac{18}{36}$, $A_{net} = 932,21 \text{ mm}^2$, $f_u = 400$ MPa.

$$F_{n,Rd} = \left[1 + 3 \cdot \frac{18}{36} \cdot \left(\frac{9,5}{50} - 0,3\right)\right] \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 0,835 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 249085 \text{ N} = 249,09 \text{ kN} \quad (14)$$

Nośność przekroju netto jest większa od siły rozciągającej cargę w stanie napełnienia: $N_{\theta,d} = 225,69 \text{ kN}$. W stanie opróżniania wartość tę należy pomnożyć przez współczynnik 1,15. Wtedy $N_{\theta,d} = 225,69 \cdot 1,15 = 259,54 \text{ kN}$. Rozpatrywany przekrój 3-3 nie przeniesie tej siły.

4.4. Nośność połączenia śrubowego

Nośność zakładkowego połączenia cienkich blach sprawdzono zgodnie z zapisami normy [16].

Śruby klasy 8.8, średnica trzpienia $d=9 \text{ mm}$. Blacha grubości $t = 1 \text{ mm}$.

Nośność pojedynczej śruby na docisk:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha_b \cdot k_t \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}, \quad (15)$$

gdzie (por. [16] tabl. 8.4):

$$\alpha_b = \min \left\{ 1, \frac{e_1}{3d} \right\} = \min \left\{ 1, \frac{37,5}{3 \cdot 9} \right\} = \min \{ 1, 1,39 \} = 1, \quad (16)$$

$$k_t = \frac{0,8 \cdot t + 1,5}{2,5} = 0,92. \quad (17)$$

Wytrzymałość stali na rozciąganie: $f_u = 400 \text{ MPa}$, częściowy współczynnik bezpieczeństwa: $\gamma_{M2} = 1,25$, ([16], p. 8.3)

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 0,92 \cdot 400 \cdot 9 \cdot 1}{1,25} = 6624 \text{ N} = 6,624 \text{ kN}. \quad (18)$$

Nośność pojedynczej śruby na ścinanie (śruba jednocięta) (por. tabl. 8.4 z normy [16]):

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}}, \quad (19)$$

gdzie:

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa (tabl. 3.1 z normy [17])}, A_s = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{9^2}{4} = 63,62 \text{ mm}^2,$$

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \cdot 63,62 \cdot 800}{1,25} = 24429,0 \text{ N} = 24,43 \text{ kN}. \quad (20)$$

O nośności połączenia decyduje nośność na docisk. Całkowita siła przenoszona przez 31 śrub:

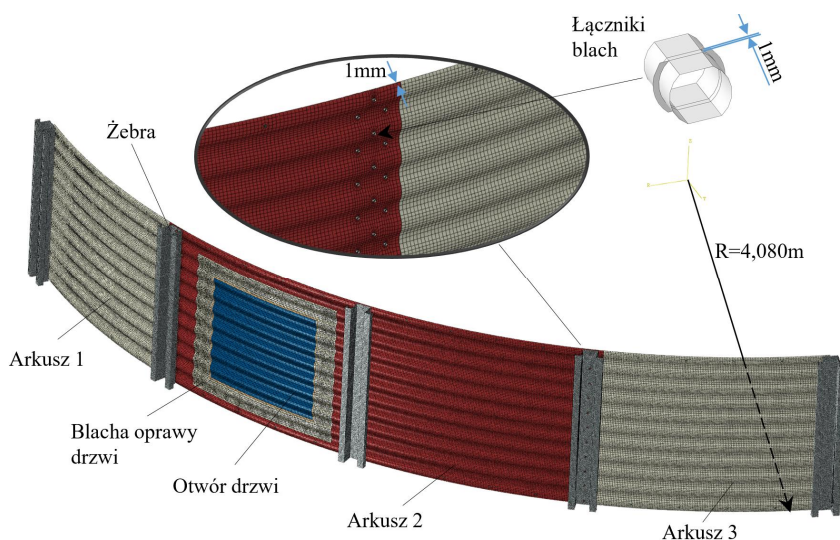
$$F_{Rd} = 31 \cdot 6,624 = 205,34 \text{ kN}. \quad (21)$$

Jest to siła mniejsza od siły występującej w całej cardze w stanie napełnienia: $N_{q,d} = 225,69 \text{ kN}$ (lub $259,54 \text{ kN}$ przy opróżnianiu). Warunek nośności połączenia śrubowego nie jest spełniony.

5. Symulacje numeryczne

W celu oszacowania rozkładu naprężeń w ścianie silosu została wykonana symulacja komputera fragmentu drugiej cargi. Do analizy został wydzielony wycinek pierścienia, składający się z całego arkusza płyty falistej z wmontowanymi drzwiami oraz dwóch połówek sąsiednich arkuszy łączonych zakładkowo. Rama drzwi jest przyspawana do osobnej, grubszej blachy falistej, mocowanej śrubami od strony zewnętrznej do arkusza 2 (por. rys. 8) z odpowiednio

wyciętym otworem. W analizie numerycznej, fragment cargi był rozważany jako przestrzenny model powłokowy z kształtem zgodnym z przekrojem blachy falistej w układzie cylindrycznym: R – kierunek promieniowy, q – kierunek obwodowy, z – os pionowa (por. rys. 8). Grubość blachy cargi wynosiła 1 mm, a grubość blachy oprawy drzwi – 2 mm. Przy nałożeniu na siebie sąsiednich arkuszy blach, odległość między powierzchniami środkowymi wynosiła 1 mm (oraz 1,25 mm dla blachy oprawy drzwi). W modelu numerycznym sąsiednie blachy umieszczano z odstępem 1 mm i łączono sztywnymi łącznikami na zdefiniowanej powierzchni kontaktu (rys. 8). Każdy łącznik składa się ze sztywnej tulei o wymiarach mniejszych niż otwór oraz fragmentu sztywnej powłoki (kołnierza) dopasowanej do kształtu arkusza, która zapewniała kontakt tulei z tym arkuszem. Na podstawie analizy wstępnej przyjęto, że powierzchnia kontaktu tulei z krawędzią otworu zawiera się w obrębie łuku o kącie środkowym równym 90° .



Rys. 8. Model dyskretny analizowanego fragmentu ściany silosu.

Symulację wykonano jako MNA (analiza materiałowo nieliniowa) metodą elementów skończonych (MES) w ujęciu trójwymiarowym przy użyciu programu Symulia Abaqus i z wykorzystaniem elementów powłokowych rodziny S4. Opracowany model dyskretny pokazano na rys. 8. Przyjęta do obliczeń siatka elementów skończonych była efektem licznych symulacji wstępnych, których celem było sprawdzenie, czy spodziewane efekty koncentracji naprężeń są wyraźnie widoczne. Zastosowanie przeważnie regularnej topologii oraz odpowiedniego zagęszczenia siatek w miejscach koncentracji naprężeń, zapewniło uzyskanie dobrej zbieżności rozwiązania równań. Ogólna liczba węzłów w modelu przyjętym do obliczeń wyniosła 487 307, a liczba równań algebraicznych (stopni swobody) – 2 923 842.

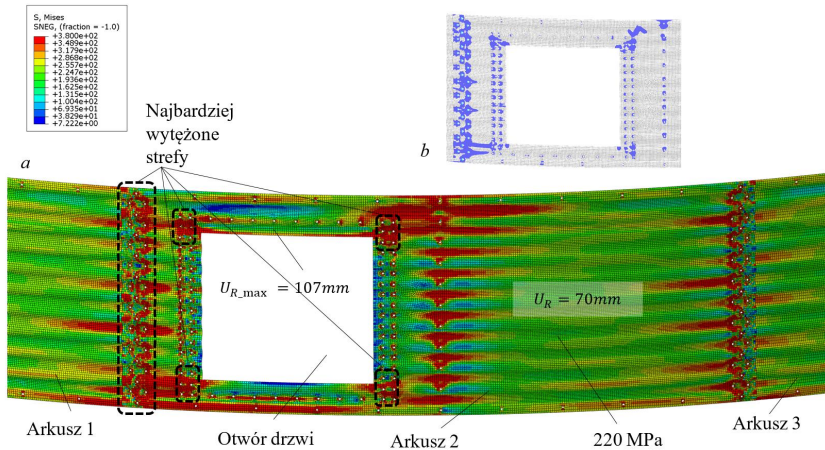
Kinematyczne warunki brzegowe składały się z trzech grup warunków: 1) warunki symetrii obwodowej na krawędziach bocznych arkuszy nr 1 i 3 przez ograniczenie przemieszczeń w kierunku obwodowym θ i kątów obrotu wokół osi R i Z ; 2) uwzględnienia współdziałania blach z sąsiednimi carginami w kierunku pionowym przez ograniczenie kątów obrotu wokół osi R i θ na górnej i dolnej krawędzi blach oraz blokowanie przemieszczeń pionowych wzdłuż dolnej krawędzi; 3) mocowania żeber przez blokowanie przemieszczeń ich dolnej części wzdłuż osi R i θ .

Do obliczeń przyjęto obciążenia zalecane normą [14] i podane w rozdziale 4.1. W symulacjach zostały uwzględnione obciążenia normalne p_{hf} i styczne p_{wf} o wartościach pokazanych

na rys. 5, zwiększone o współczynniki obciążeniowe jak dla stanu opróżniania (por. p. 4.1). Obciążenia przyłożono także na obszary łączników śrubowych oraz powierzchni drzwi widocznej od wewnątrz. W tym celu wprowadzono „fikcyjną” wiotką powłokę wypełniającą otwory. Przyjęto materiał cargi jako biliniowy materiał sprężysto plastyczny (rys. 4).

Rozwiązanie MNA zostało wykonane przyrostową metodą Newtona Raphsona za sterowaniem obciążeniem. Cargi silosu posiadają wiele elementów zaburzających osiowo-symetryczny rozkład naprężeń w ścianach. Do takich stref przede wszystkim można zaliczyć strefy otworów, strefy zwiększenia sztywności ścian w miejscach nałożenia arkuszy blach na siebie wraz z mimośrodowym łączeniem tych arkuszy oraz miejsca łączenia blach z żebrami.

Obliczenia wykazały, że po pełnym obciążeniu w miejscach pionowych rzędów otworów pojawiają się liczne strefy osiągnięcia granicy plastyczności ($f_y = 380$ MPa). Są to strefy w miejscu zakładkowego połączenia blach oraz strefy otworów podwójnych rzędów mocowania blachy oprawy drzwi (rys. 9a). W miejscach tych powstają znaczące deformacje trwałe (przemieszczenia promieniowe U_R przekraczające 100 mm), obejmujące obszary między otworami w blachach, co dobrze widać na rozkładzie efektywnych odkształceń plastycznych (rys. 9b).



Rys. 9. Rozkład naprężeń i deformacji w arkuszach blachy po obciążeniu: *a* – naprężenia Hubera-Misesa-Hencky’ego w [MPa], *b* – efektywne odkształcenia plastyczne powyżej 0,1%.

Oznacza to, że w tych obszarach rozerwanie blachy jest bardzo prawdopodobne. Na pozostałych fragmentach cargi naprężenia obwodowe wyniosły około 210–240 MPa, nie osiągały więc granicy plastyczności.

Wykonane symulacje numeryczne potwierdzają, że uwzględnione obciążenia prowadzą do istotnego przekroczenia nośności blach cargi w bezpośrednim sąsiedztwie otworu pod drzwi włączowe oraz w linii łączenia rozważanej cargi z żebrami.

6. Wnioski

Głównym celem przeprowadzonych analiz było ustalenie przyczyny rozerwania blach ściany silosu na granicy cargi drugiej i trzeciej licząc od pierścienia leja wysypowego. Ten cel nadrzędny determinował zakres wykonanych analiz. Zarówno obliczenia analityczne wynikające ze szczegółowych zapisów normowych jak i symulacje numeryczne zostały ograniczone do zakresu niezbędnego do wyjaśnienia zaobserwowanego mechanizmu rozszczelnienia silosu.

W efekcie przeprowadzonych obliczeń analitycznych, w których wykorzystano procedury normowe, wykazano, że w stanie wypełnienia silosu pszenicą, w miejscu łączenia arkuszy blach ściany silosu, na poziomie drugiej cergi, dochodzi do przekroczenia nośności śrub na docisk. Kolejnym miejscem, w którym może dojść do rozerwania blachy jest przekrój 3-3 (por. rys. 7) osłabiony otworami na śruby mocujące oprawę drzwi włączowych do blachy cergi.

Zidentyfikowane mechanizmy rozerwania blachy rozpatrywanej cergi zostały także potwierdzone w wykonanych symulacjach numerycznych. W przeciwieństwie do obliczeń analitycznych nie zakładano w nich równomiernego rozkładu sił na wszystkie łączniki i wszystkie fragmenty łączonych blach. Otrzymany w symulacjach numerycznych, najbardziej prawdopodobny mechanizm zniszczenia polegał na rozerwaniu blachy w pobliżu miejsca osadzenia drzwi włączowych i taki mechanizm wystąpił w przedmiotowym silosie.

Należy wspomnieć, że normy [18 i 19] zawierają zalecenia dotyczące sposobu konstruowania otworów w płaszczu silosu czy zbiornika. Dla każdego projektanta konieczność wzmocnienia otworu przynajmniej do poziomu nośności ścianki nieosłabionej powinna być zaleceniem oczywistym. Opisana awaria dowodzi, że miejsca osłabienia płaszczu silosu otworami technologicznymi powinny być zaprojektowane szczególnie starannie.

Literatura

1. Hotała E., Kuśnierek M., Kulczycki T., Wójcik T., Strefa przejściowa jako słabe miejsce płaszczu silosu z blachy falistej z fartuchem podporowym, XXVIII Konferencja Naukowo-Techniczna. Awary Budowlane, Szczecin–Międzyzdroje 2017, s. 659–668.
2. Rejowski K., Iwicki P., Simplified stability analysis of steel cylindrical silos with corrugated walls and vertical columns. Recent Progress in Steel and Composite Structures – Giżejowski et. al. (Eds). Taylor & Francis Group, London 2016, s. 525–532.
3. 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). Taylor & Francis Group, London 2016, s. 186–187.
4. Hotała E., Kuśnierek M.: Nośność południkowych żeber płaszczu silosów z blachy falistej. Materiały Budowlane, nr 5/2016, s. 93–94.
5. Hotała E., Kuśnierek M., Skotny Ł., Boniecka J.: Wadliwe połączenia żeber przyczyną awarii stalowych silosów o płaszczach z blach falistych, XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna. Awary Budowlane, Szczecin–Międzyzdroje 2015, s. 501–508.
6. Hotała E.: Stalowe silosy na produkty rolne – rozwiązania konstrukcyjne, analizy nośności, trwałość, awary, Budownictwo na obszarach wiejskich – monografie, redakcja Anna Halicka, Lublin 2013, s. 231–243.
7. Błażejowski P., Marcinowski J.: Nośność wyboczeniowa żeber wzmocniających ściany stalowego silosu na zboże. Budownictwo i Architektura, nr 12(2)/2013, s. 189–196.
8. Hotała E.: Stalowe silosy na produkty rolne – rozwiązania konstrukcyjne, analizy nośności, trwałość, awary. Politechnika Lubelska, Lublin 2013, s. 231–243.
9. Hotała E., Skotny Ł., Stateczność walcowych płaszczu silosów stalowych uźebrowanych nad podporami odcinkowymi, „Przegląd Budowlany”, 6/2012, s. 119–122.
10. Wójcik M., Iwicki P., Tejchman J., Analiza nośności wyboczeniowej cylindrycznego silosu z blachy falistej wzmocnionej słupami, „Inżynieria i Budownictwo”, Nr 2/2011, s. 96–100.
11. 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.
12. Hotała E.: Awaryjność silosów z blachy falistej, „Materiały Budowlane”, 2/2006 (nr 402), s. 37–39.
13. 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.
14. PN-EN 1991-4: 2006, Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki.
15. PN-EN 1993-1-1: 2006, Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

16. PN-EN 1993-1-3: 2006, Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształowników i blach profilowanych na zimno.
17. PN-EN 1993-1-8: 2006, Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.
18. PN-EN 1993-4-1: 2009, Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 4-1: Silosy.
19. PN-EN 1993-4-2: 2009, Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 4-2: Zbiorniki

Rupture of the steel sheet of the silo wall. A case study

Abstract: The subject of the analyzes presented in the paper is a steel silo for storing grain with a capacity of 934 m³ used as intended for three consecutive years. The silo is equipped with a discharge hopper, and its walls are made of corrugated steel reinforced with external ribs made of cold-formed sections. The sheet metal of the silos wall ruptured during the initial phase of emptying the silo filled with wheat. An employee operating the grain transfer system noticed a stream of pouring grain at the point where the sheet of the second course was broken above the ring of the discharge hopper. Suspension of the discharging operation stopped the process of progressive tearing of the sheet metal on the edge of the hatch door housing. The paper presents detailed considerations focused on determining the cause of the silo failure. Material tests, analytical calculations made with the use of the applicable standard provisions and numerical simulations made with the help of the Abaqus system allowed to identify the most probable mechanisms of steel sheet breaking.

Key words: steel silo, corrugated steel sheet, rupture of the steel sheet, material tests, analytical calculations, numerical simulations