

Silosy z cienkich blach – wybrane zagadnienia badawcze i projektowe

Dr inż. Ryszard Antonowicz, dr inż. Adam Klimek, Politechnika Wroclawska

1. Wprowadzenie

Opisane w artykule cylindryczne silosy stalowe stosowane są powszechnie do składowania, przechowywania i konserwacji różnych gatunków zbóż. Wyparty one prawie całkowicie silosy żelbetonowe w kategorii małych i średnich ładowności (do kilku tys. ton), choć mają też zastosowanie – po odpowiednich modyfikacjach – do przechowywania większych ilości ziarna [4, 5]. Występują zarówno pojedynczo, jak i w bateriach. Są chętnie stosowane przez rolników indywidualnych, zakłady przetwórstwa zbóż, producentów pasz, zakłady młynarskie. Oprócz zastosowań agrotechnicznych występują w przemyśle chemicznym i w różnych zastosowaniach z dziedziny inżynierii procesowej.

Zjawiska związane z przepływem materiałów sypkich w silosach były wielokrotnie przedmiotem badań i doczekały się dużej liczby publikacji, monografii, podręczników i patentów. Na ogół badania w tej dziedzinie wynikają ze ścisłej współpracy z przedstawicielami branż zajmujących się w jakikolwiek sposób materiałem sypkim i wynikają wprost z konkretnych zapotrzebowań tego przemysłu. Przegląd pewnej części prac traktujących o składowaniu, przechowywaniu i transportowaniu materiałów sypkich można znaleźć m.in. w pracy [2].

Cechą charakterystyczną stalowych silosów cienkościennych o przekroju kołowym jest mała grubość blach płaszczy i lejów, wynikająca z dużej wytrzymałości

stali. Cylindryczny kształt zbiornika zapewnia uzyskanie prawie błonowego stanu naprężeń w powłoce, co pozwala na wykonywanie płaszczy i lejów z blach grubości 1,25–8 mm. Smukłości takich powłok zawierają się w granicach $r/t = 250\text{--}1000$ i więcej [1]. Konsekwencją stosowania tak cienkich blach jest duża wrażliwość powłok na utratę stateczności ogólnej lub miejscowej w przypadku wystąpienia południkowych lub równoleżnikowych naprężeń ściskających. Imperfekcje geometryczne występujące w realnym obiekcie oraz dynamika zjawisk związanych z przepływem materiału sypkiego sprawiają, że analiza i proces projektowania silosów cienkościennych są złożone. Projektowanie silosów stalowych opiera się o normę [7].

2. Typowe rozwiązania konstrukcyjne silosów na zboże

Silosy cienkościenne na zboże mogą być lejowe [10] lub płaskodenne [12]. W obu przypadkach płaszcze zbiorników wykonywane są z cienkich blach o grubości od 1,25 do 3,0 mm skręcanych śrubami na miejscu budowy.

Poszczególne arkusze blach posiadają przy krawędziach otwory do połączeń pionowych i poziomych z sąsiednimi arkuszami. Formatowanie składowych części płaszcza i wybijanie otworów wykonywane jest w obrabiarzach sterowanych numerycznie. Pojedynczy pierścień o wysokości około 80–100 cm tworzy zwykle od 3 do 12 arkuszy blachy. W omawianej technologii płaszczy komory usztywniony jest podłużni-



Rys. 1. Bateria silosów z cienkich blach (zdjęcie opublikowane dzięki uprzejmości firmy AGREMO [10])



Rys. 2. Silosy lejowe – widoczne pierścienie podporowe wsparte na słupkach z rur (zdjęcie opublikowane dzięki uprzejmości firmy AGREMO, [10])

camy wykonanymi z zimnogiętych profili o kształcie litery C lub kape-luszowych, których zadaniem jest zapewnienie sztywności powłoki płaszczu.

Stożkowe przekrycie dachu wyko-nane jest, podobnie jak część cylindryczna, z segmentów odpowiedniego kształtu (najczęściej w liczbie od 8 do 24). Całość zamknięta jest od góry dachem z otworem zasypowym.

Płaszcz silosu lejowego wsparty jest na pierścieniu podporowym zakrzywionym w planie, wykonanym z profilu walcowanego lub spawanego (rys. 2). Pierścień podporowy oparty jest na słupach o wysokości wynikającej z kąta nachylenia leja (zwykle około 45° lub więcej). Liczba słupów waha się najczęściej od 4 do 8.

Przy większej liczbie słupów zachodzi konieczność dokładnego wypoziomowania pierścienia podporowego. Niedokładne wypoziomowanie pierścienia może spowodować zwiększenie sił w części słupów.

Płaszcz silosu płaskodennego opiera się bezpośrednio na kołowej bądź wielobocznej żelbetowej płycie fundamentowej. Ze względów użytkowych i z uwagi na trwałość,

najniższe pierścienie płaszczu mają większą grubość. Do opróżniania służy w tym przypadku przenośnik ślimakowy umieszczony pod ażurową podłogą. W tego rodzaju silosach istnieje możliwość suszenia ziarna przez wprowadzenie od strony podłogi strumienia gorącego powietrza.

Dodatkowym wyposażeniem zbiorników jest drabina zewnętrzna

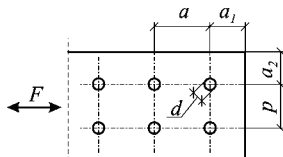
i wewnętrzna (opcjonalnie) oraz przenośnik lub rura do załadunku pneumatycznego, a także klapy bezpieczeństwa wyrównujące podciśnienie powstające przy opróżnianiu, elementy kontroli stanu ziarna (sondy do pomiaru temperatury i wilgotności). Baterie silosów zaopatrzone są w pomosty komunikacyjne, eksploatacyjne i transportowe.

3. Połączenia śrubowe cienkich blach

W silosach zbożowych można stosować połączenia śrubowe [7], o ile są one szczelne na przenikanie wody deszczowej. Stosowane śruby są ocynkowane ogniowo, a ich łby znajdują się wewnątrz komory. Zalecenia powyższej normy dotyczą też odchytek kształtu komory i maksymalnych wartości lokalnego odkształcenia płaszczu. Należy również brać pod uwagę ewentualny naddatek grubości ścian komory i leja związany z korozją i erozyjnym działaniem składowanego materiału. Cienkie blachy płaszczu i leja łączone na śruby ($t \leq 4$ mm) powinny być gatunku S235. Dotyczy to też podłużnic, wręg i pierścieni podporowych.

Tabela 1. Nośność śrub w połączeniu blach o grubości $t \geq 1,25$ mm – na podstawie [6]

Sposób przyłożenia obciążenia	Stan graniczny	Nośność obliczeniowa śruby w połączeniu	
Siła prostopadła do osi łącznika	ścięcie trzpienia	Klasa 4.6, 5.6, 8.8 $S_{Rv} = \frac{0,6 f_{ub} A_{sb}}{\gamma_{m2}}$	Klasa 4.8, 5.8, 6.8, 10.9 $S_{Rv} = \frac{0,5 f_{ub} A_{sb}}{\gamma_{m2}}$
	owalizacja otworu lub rozerwanie blachy	$S_{Rb} = \frac{2,5 f_u d t}{\gamma_{m2}} \leq \frac{f_u a_1 t}{1,2 \gamma_{m2}}$	
	rozerwanie przekroju netto	$S_{Rn} = \frac{\left[1 + 3r \left(\frac{d_0}{u} - 0,3 \right) \right] A_n \cdot f_u}{n_p \cdot \gamma_{m2}} \leq \frac{A_n \cdot f_u}{n_p \cdot \gamma_{m2}}$ $r = \frac{n_1}{n_p} \quad u = 2a_2 \leq p$	
dodatkowo: $S_{Rv} \geq 1,25 \cdot S_{Rb}$; $S_{Rv} \geq 1,25 \cdot S_{Rn}$			
Ograniczenia: $a_1 \geq 1,5a$, $a \geq 3d$ $a_2 \geq 1,5d$, $p \geq 3d$		Symbole: f_{ub} – wytrzymałość na rozciąganie stali śruby; A_{sb} – pole przekroju rdzenia śruby; γ_{m2} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa ($\gamma_{m2} = 1,25$); f_u – wytrzymałość na rozciąganie stali blachy; d_0 – średnica otworu; n_p – liczba wszystkich łączników w połączeniu; n_1 – liczba łączników w poprzecznym przekroju połączenia; A_n – pole przekroju netto.	



Projektowanie połączeń blach o grubości $t \geq 3$ mm wykonuje się w oparciu o normę [8]. W przypadku zaś blach cieńszych ($t < 3$ mm) projektowanie i konstruowanie połączeń śrubowych przeprowadza się zgodnie z zasadami podanymi w normie [6]. Dotyczy to również blach fałdowych powszechnie stosowanych w budownictwie stalowym [3]. Stany graniczne połączeń blach o grubości $t \geq 1,25$ mm przy użyciu śrub średnicy min. M6 sprawdza się za pomocą procedur analitycznych, zaś blach cieńszych na podstawie załącznika normatywnego (doświadczalnie), w oparciu o przepisy europejskie [9]. Zgodnie z zaleceniami normy [6], przeprowadzenie badań doświadczalnych połączeń przeprowadza się m.in. w następujących okolicznościach:

- gdy nie istnieją procedury analityczne dotyczące projektowania wyłącznie na drodze obliczeń;
 - w celu sprawdzenia poprawności procedury analitycznej;
 - gdy nie są dostępne realistyczne dane wymagane do projektowania.
- Głównym powodem przeprowadzenia badań opisanych niżej była grubość blach $t < 1,25$ mm. W tabeli 1 podano procedurę analityczną stosowaną przy sprawdzaniu nośności połączeń blach o grubości $t \geq 1,25$ mm z siłą działającą prostopadłe do osi łączników.

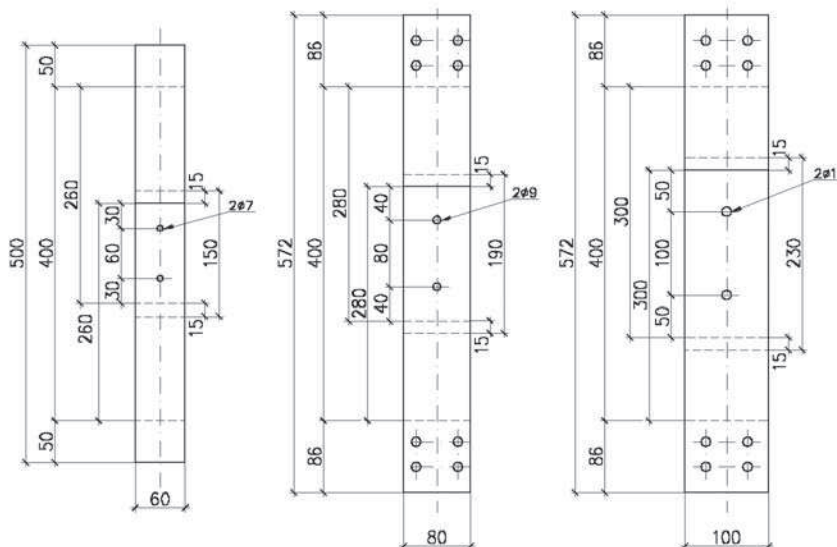
4. Badania połączeń

Procedura badawcza

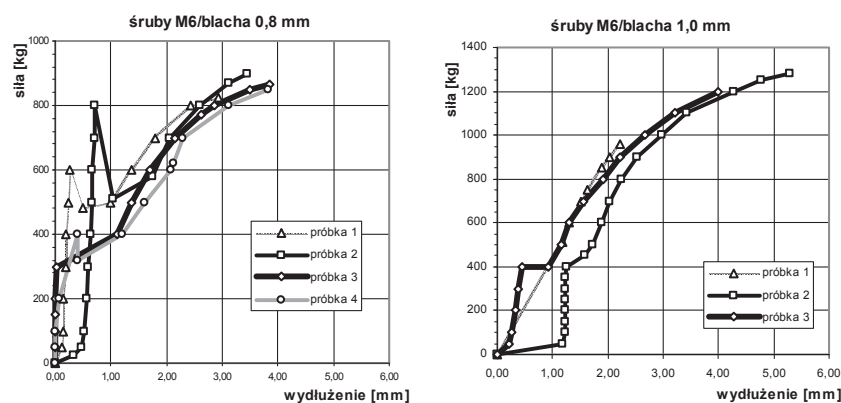
Badania wykonano w oparciu o standardową próbę ścinania [9] na seriach próbek obciążanych metodą obciążenia przyrostowego. Analizie poddano kombinacje śrub i grubości blach zestawione w tabeli 2. Zastosowano śruby klasy 5.8 oraz blachę o wytrzymałości na rozciąganie $f_u = 215$ MPa. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej posiadających trzy zakresy: A – 2000 kg, działka 5 kg; B – 5000 kg, działka 10 kg; C – 10000 kg, działka 20 kg.

Tabela 2. Kombinacje średnic śrub i grubości blach poddanych analizie

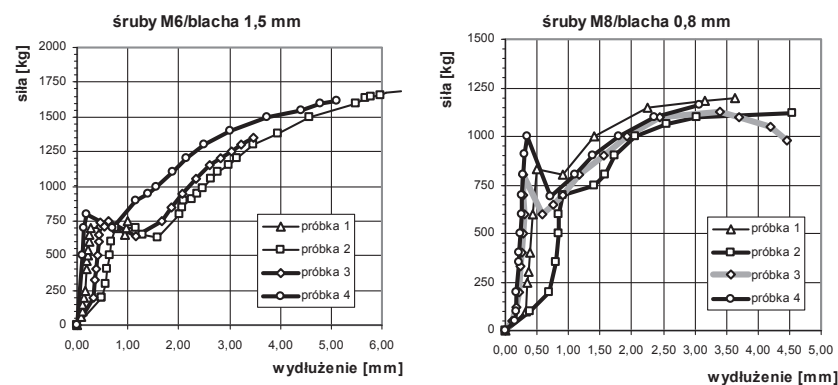
Średnica nominalna śruby [mm]	6	6	6	8	8	8	10	10
Grubość blachy [mm]	0,8	1,0	1,5	0,8	1,0	1,5	3	3



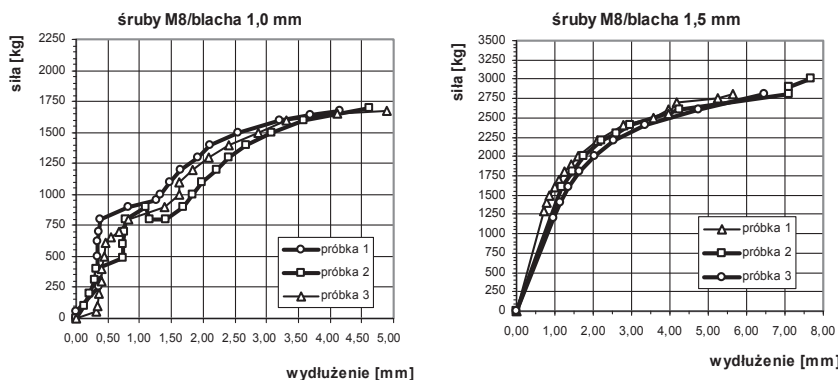
Rys. 3. Próbkę do badań połączeń; dla śrub M6 – po lewej, M8 – w środku oraz M10 – po prawej



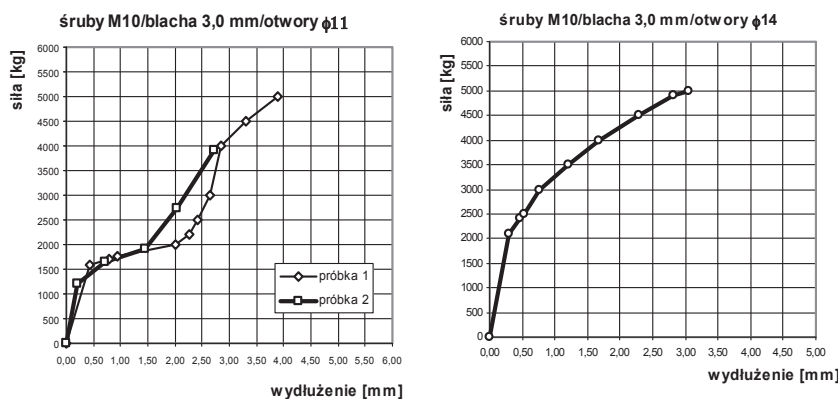
Rys. 4. Zależność siły rozciągającej połączenie w funkcji wydłużenia bazy pomiarowej; z lewej: śruby M6, blacha 0,8 mm (4 próbki); z prawej: śruby M6, blacha 1,0 mm (3 próbki)



Rys. 5. Zależność siły rozciągającej połączenie w funkcji wydłużenia bazy pomiarowej; z lewej: śruby M6, blacha 1,5 mm (3 próbki); z prawej: śruby M8, blacha 0,8 mm (4 próbki)



Rys. 6. Zależność siły rozciągającej połączenie w funkcji wydłużenia bazy pomiarowej; z lewej: śruby M8, blacha 1,0 mm (3 próbki); z prawej: śruby M8, blacha 1,5 mm (3 próbki)



Rys. 7. Zależność siły rozciągającej połączenie w funkcji wydłużenia bazy pomiarowej; z lewej: śruby M10, blacha 3,0 mm (2 próbki) otwory $\varnothing 11$ mm; z prawej: śruby M10, blacha 3,0 mm (1 próbka) otwory $\varnothing 14$ mm

Tabela 3. Nośności wyznaczone metodami analitycznymi (obliczeniowe) i na podstawie badań (charakterystyczne z uwzględnieniem liczebności próbek i odchylenia standardowego)

Nośność obliczeniowa śruby w połączeniu [kN]	Śruby M6 kl. 5.6			Śruby M8 kl. 5.6			Śruby M10 kl. 5.6	Śruby M10 kl. 5.6	
	grubość blachy [mm]								
	0,8	1	1,5	0,8	1	1,5	3 (otwory $\varnothing 11$)	3 (otwory $\varnothing 14$)	
Wzory normowe – patrz tab.1	S_{Rv}	5,50			9,84			13,92	13,92
	S_{Rb}	2,10	2,58	3,87	3,10	3,87	5,81	12,90	12,90
	S_{Rn}	1,64	2,05	3,08	2,69	3,36	5,04	9,87	11,54
Z badań	S_B	2,31	3,50	4,03	3,85	5,18	8,23	14,70	17,50
Mechanizm zniszczenia połączenia	Przeciąganie tba przez blachę jak w połączeniach obciążonych równolegle do osi łącznika			Przeciąganie tba przez blachę jak w połączeniach obciążonych równolegle do osi łącznika			Ścięcie trzpieni	Ścięcie trzpienia z owalizacją otworów	Ścięcie trzpienia z silną owalizacją otworów i deformacją podkładek
	Ścięcie trzpieni			Silna owalizacja otworów z tendencją do przeciągnięcia tba przez blachę					
Całkowite uplastycznienie połączenia, obrót osi łączników w kierunku równoległym do działania siły									

Na bazie pomiarowej w każdej próbie montowano zegarowy czujnik przemieszczenia o zakresie 10 mm (działka 0,01 mm) lub o zakresie 50 mm (działka 0,01 mm).

Przed przystąpieniem do badań dokonano losowo kontroli geometrii próbek i momentu dokręcenia śrub. Wymiary mieściły się w dopuszczalnych granicach [9]. Śruby dokręcono kluczem o minimalnej wartości momentu dokręcenia 20 Nm.

Próbki zostały przygotowane według wytycznych [9] – rys. 3.

Wyniki badań i analiz

Wyniki badań wszystkich próbek, obejmujące zależność siły rozciągającej od wydłużenia bazy pomiarowej, przedstawiono na rysunkach od 4 do 7.

Porównanie nośności połączeń wyznaczonych w oparciu o zależności podane w tabeli 1 z nośnościami wyznaczonymi na podstawie badań wraz z opisem mechanizmu zniszczenia przedstawiono w tabeli 3.

Odształcenia łączonych blach i przemieszczenia łączników charakterystyczne dla niektórych konfiguracji pokazano na rysunku 8.

Wśród badanych połączeń wyraźnie można wyodrębnić trzy grupy. W grupie pierwszej są połączenia najcieńszych blach, tj. o grubości 0,8 mm. W połączeniach tych, z uwagi na dużą podatność blachy, połączenia niszczą się przez rozdarcie blachy wokół łba śruby i nakrętki (odpowiednio do położenia względem szczęk maszyny). Osie łączników wyraźnie się obracają podczas rozciągania.

Do drugiej grupy należy zaliczyć połączenia, których zniszczeniu towarzyszy ścięcie trzpienia (M6/1,5 mm i M10/3,0 mm). Ścięciu towarzyszy umiarkowana owalizacja otworów.

Trzecią grupę stanowią połączenia, których nie udało się rozłączyć pomimo znacznego wydłużenia. Łączniki obróciły się o blisko 90° od swego pierwotnego położenia. Typowe połączenie w tej grupie to M8/1,5 mm. Śruby ustawiły się prawie równoległe do kierunku

działania siły, uplastyczniając strefę wokół łba i nakrętki. W grupie tej dominują silna owalizacja otworów i znaczne odkształcenia strefy wokół łącznika.

Podczas rozciągania połączeń najcieńszych blach, po szybkim wstępnym naciągnięciu, występuje wyraźne „płynięcie” – brak przyrostu lub spadek siły przy zwiększającym się wydłużeniu bazy pomiarowej. Można to wytłumaczyć utratą przyczepności i poślizgiem łączników w połączeniu, które przesuwają się do krawędzi otworów. W późniejszym etapie siła wzrasta łagodniej wraz z wydłużeniem próbki.

Wnioski z badań

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

– we wszystkich rodzajach badanych połączeń otrzymano większe wartości nośności charakte-

rystycznych niż z wzorów normowych: zbadane nośności połączeń śrubami M6 są średnio o 47% większe od nośności normowych, zaś w połączeniach śrubami M8 o 53%,

– blachy o grubości 0,8 mm rozrywają się wokół łba i wydają się za cienkie do tego typu połączeń, zauważono wyraźny wzrost nośności połączenia już przy zastosowaniu blachy o grubości 1,0 mm,

– najbardziej optymalnym połączeniem, z równomierną współpracą wszystkich elementów, jest połączenie blach o grubości 1,5 mm śrubami M8, połączenie to charakteryzuje się względnie dużymi przemieszczeniami,

– zniszczenie połączeń blach grubszych następuje w sposób nagły, przy względnie niewielkich przemieszczeniach – przez ścięcie trzpienia (nieostrzegawczy charakter zniszczenia).

5. Zagadnienia projektowe

Wykonano obliczenia dla typowego silosu lejowego [11] skręcane- go śrubami, o geometrii i charakterystyce pokazanej na rysunku 9.

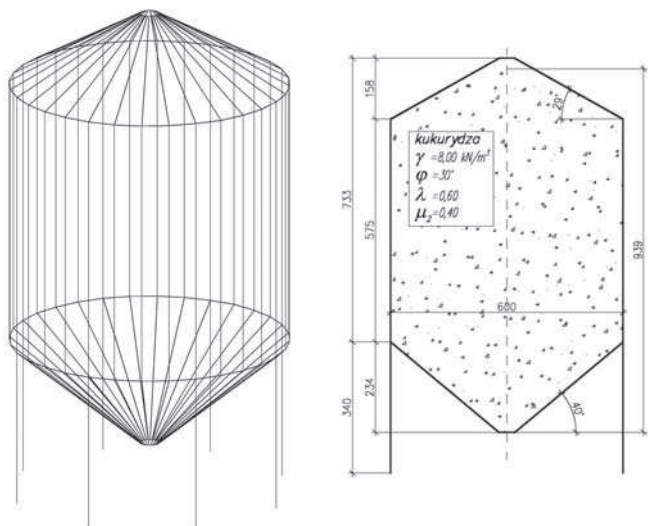
Parametry rozpatrywanego silosu, pokazanego na rysunku 9 i rodzaj materiału sypkiego generują przepływ rdzeniowy. W obliczeniach uwzględniono oddziaływania od składowanego materiału: napór poziomy i styczny (rys. 10) oraz napór miejscowy, wpływ temperatury (ochłodzenie płaszcza), wpływ wiatru, reakcje od dachu i pierścienia podporowego.

Zaprojektowano podział szwu łączącego elementy leja na trzy jednakowe odcinki: najwyższy (przy pierścieniu podporowym), środkowy i najniższy (przy otworze wysypowym).

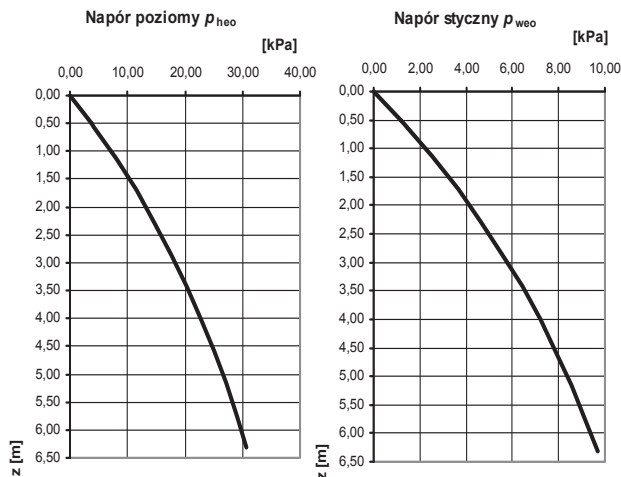
Połączenie segmentów leja zaprojektowano śrubami M12 kl. 5.8, zachowując odległości między śrubami w rzędzie (w osiach) odpowiednio: przy pierścieniu podporowym 75 mm, w środku 100 mm, w najniższym odcinku 65 mm.



Rys. 8. Przykładowe postacie zniszczenia próbek i łączników; w górnym rzędzie od lewej: próbka w maszynie wytrzymałościowej, śruby M6/blacha 0,8 mm, M6/1 mm; w dolnym rzędzie od lewej: M6/1,5 mm, M8/1,5 mm od strony łbów, M8/1,5 od strony nakrętek



Rys. 9. Szkic analizowanego silosu – z lewej i dane wyjściowe do projektowania – z prawej



Rys. 10. Wykresy naporu poziomego i stycznego (wartości obliczeniowe) działających podczas opróżniania w silosie pokazanym na rysunku 9

6. Zakończenie

Silosy zbożowe o małych i średnich ładownościach z cienkich blach łączonych śrubami są bardzo popularne wśród rolników indywidualnych, w zakładach przetwórstwa zbożowego i magazynach. Niewielki koszt konstrukcji, krótki czas realizacji, wyeliminowanie ciężkiego sprzętu i spawania na budowie sprawia, że tego rodzaju zbiorniki są chętnie stosowane. Przedstawione w artykule badania i analiza różnych konfiguracji połączeń pozwoliły na ich optymalizację w procesie projektowania i konstruowania konkretnych obiektów. W niewielkim zakresie grubości blach (0,8÷1,5 mm) zauważono podczas badań istotne różnice jakościowe i ilościowe w odniesieniu do mechanizmu zniszczenia i nośności połączeń. Tylko w tym zakresie grubości blach można wyróżnić trzy różne mechanizmy zniszczenia. Połączenia blach o grubości 0,8 mm mają, zdaniem autorów, za małą nośność, aby

można je było stosować w rozciąganych powłokach silosów. Proporcje nośności połączeń do nośności blachy są w tym wariancie bardzo niekorzystne. Wydaje się, że najcieńsza blacha możliwa do zastosowania w tego typu obiektach, powinna mieć grubość 1,25 mm (a wyjątkowo 1,0 mm dla małych silosów).

Z uwagi na wymienione wyżej różnice jakościowe, w zachowaniu połączeń należałoby dokładniej zbadać połączenia blach o grubościach z zakresu 1,0÷2,5 mm.

BIBLIOGRAFIA

[1] Hołała E., Nośność graniczna nieuzębrowanych cylindrycznych płaszcz silosów stalowych, Seria monografie nr 35, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003
 [2] Roberts A. W., Bulk Solids Handling – An Historical Overview and Current Developments, Bulk Solids Handling (6) 2006, s. 392–419, Vogel Transtech Publications GmbH
 [3] Bródka J. i in., Blachy fałdowe w budownictwie stalowym, Arkady, Warszawa 1999
 [4] Blight G. E., Strain and Temperature Measurements on an Externally Stiffened

Corrugated Steel Grain Silo, Powder Handling and Processing, 4 (1989)
 [5] Blight G. E., Behaviour of a Bolted Corrugated Steel Grain Silo, Powder Handling and Processing, 2 (1989)
 [6] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-B-03207 Konstrukcje stalowe. Konstrukcje z kształtowników i blach profilowanych na zimno. Projektowanie i wykonanie, 2002
 [7] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-B-03202 Konstrukcje stalowe. Silosy na materiały sypkie. Obliczenia statyczne i projektowanie, 1996
 [8] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-92/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie, 1990
 [9] European Recommendations for Steel Construction: The Design and Testing of Connections in Steel Sheet piling and Sections. ECCS Committee TC7, TWG 7.2, May 1983. ECCS Publication, No 42
 [10] Materiały informacyjne przedsiębiorstwa „AGREMO”, ul. Parkowa 7, Skarbimierz-Osiedle, strona internetowa: www.agremo.pl
 [11] Klimek A., Antonowicz R., Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe silosu zbożowego z lejem zsywowym SUZ 100. Opracowanie na zlecenie Firmy „AGREMO”. Wrocław – Pisarzowice, luty 2005 r.
 [12] „BIN” Sp. z o.o., Silosy zbożowe z aktywną wentylacją, dokumentacja techniczno-ruchowa, Nr wydania V, Aleksandrów Kujawski, 2001

Tabela 4. Rozstawy śrub M8 w połączeniach płaszcz

Rzędna (od poziomu pierścienia podporowego) [m]	Grubość blachy płaszcz [mm]	Rozstaw śrub w kierunku szwu (pionowym) [mm]	Liczba rzędów śrub [-]
od 0 do 1,15	1,5	40	2
od 1,15 do 3,45	1,25	50	2
od 3,45 do 5,75	1,25	60	2