

Badania stalowych silosów do składowania biomasy

Dr hab. inż. Eugeniusz Hołała, mgr inż. Kamil Pawłowski, Politechnika Wrocławska

1. Wprowadzenie

Biomasa to podatne na rozkład biologiczny frakcje produktów, odpadów przemysłowych oraz pozostałości przemysłu rolnego i leśnego. Stanowi ona naturalne źródło energii i jest obecnie szeroko wykorzystywana w energetyce. Powszechnie wykorzystywane są obecnie pelety ze zrębków drzewnych, trocin i roślin z upraw energetycznych oraz pelety ze słomy, siana i łusek słonecznika. Nie do rzadkości należy również wykorzystywanie zboża niskiej jakości jako surowca energetycznego.

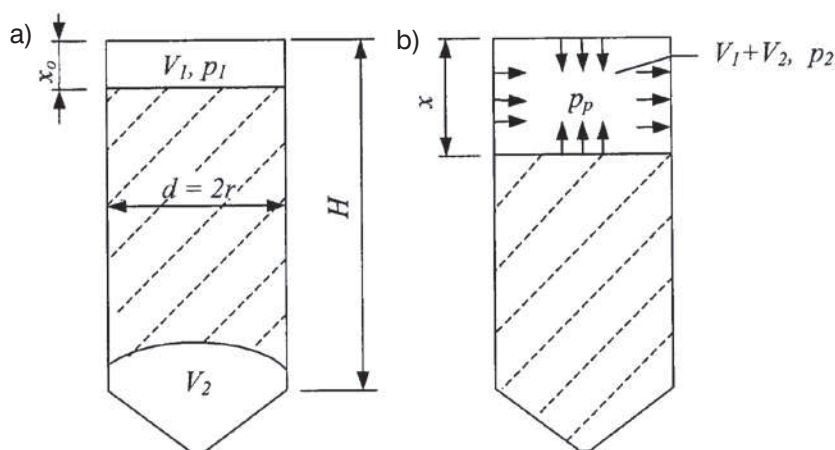
Charakterystyczną cechą peletów z różnych rodzajów biomasy jest bardzo duże zróżnicowanie ich właściwości, takich jak: ciężar objętościowy γ , kąt tarcia wewnętrznego φ_p , współczynnik tarcia o ścianę silosu μ oraz iloraz parcia bocznego K . To zróżnicowanie utrudnia właściwe wyznaczanie oddziaływań na ściany, leje lub płaskie dna silosów do składowania tych materiałów rozdrobnionych. Właściwości biomasy składowanej w silosie nie są stałe i zależą od poziomu naprężeń, kształtu ziaren, upływu czasu, wilgotności otoczenia, sposobu napełniania silosu i oddziaływań temperatury. Istotną właściwością prawie wszystkich rodzajów biomasy jest kohezja c , której wartość zwiększa się pod wpływem wilgoci i czasu składowania. Kohezyjne materiały mają dużą skłonność do tworzenia przesklepień na różnych wysokościach płaszczy silosów (rys. 1), które prowadzą do nawet kilkukrotnego zwiększenia południkowych sił w płaszczy z blach gładkich lub w żebrach silosów z blach falistych [6]. To nieprzewidywane w normach

projektowania zwiększenie sił południkowych wynika z „zawieszenia” się dużej masy materiału na płaszczy silosu, która w normalnych warunkach obciąża nie tylko płaszczy, ale i dno lub lej silosu. Podczas tąpnięcia przesklepienia dochodzi do wystąpienia krótkotrwałego podciśnienia p_2 (rys. 1b) pod dachem silosu, którego efektem mogą być bardzo duże siły południkowe w płaszczy silosu lub w jego żebrach.

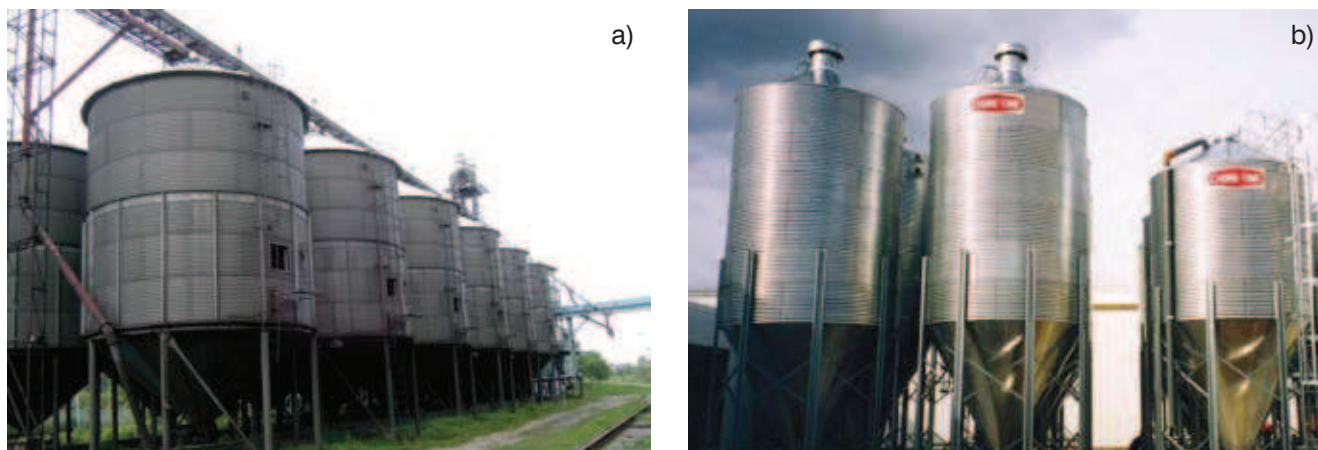
Dotychczasowe, ale dopiero kilkuletnie doświadczenia wskazują na liczne przypadki poważnych awarii silosów stalowych do składowania biomasy, w których zastosowano tradycyjne rozwiązania konstrukcyjne. Do składowania biomasy wykorzystuje się często silosy o cylindrycznych płaszczy z cienkiej blachy falistej, stosowane od wielu lat w przemyśle rolno-spożywczym. Płaszcze tych silosów są na ogół uźebrowane południkowo na całej wysokości lub w części dolnej (rys. 2). Wiele z takich silosów stalowych jest eksploatowanych w stanie zagrożenia awaryjnego,

o czym nie wiedzą ich użytkownicy. W wielu silosach doszło do poważnych awarii i katastrof budowlanych (rys. 3), w których z reguły ginęli ludzie [1], [2], [3], [4]. Przyczyny tego niekorzystnego stanu, dotyczącego stalowych silosów z blachy falistej, są złożone, a ich eliminowanie nie jest łatwe, gdyż zagadnienia te ciągle nie są dobrze rozpoznane.

W ostatnich latach stosuje się dość często silosy z blach falistych, których płaszcze nie mają praktycznie południkowego uźebrowania (rys. 2b). W takich konstrukcjach podatność płaszczy w kierunku południkowym jest wielokrotnie większa od południkowej podatności podobnych płaszczy z żebrami południkowymi lub płaszczy z blach płaskich. W skrajnym przypadku bardzo wiotkich płaszczy (np. płaszczy z tkaniny, worek itp.) nie przenoszą one żadnych południkowych obciążeń, a parcie materiału sypkiego p_v na płaskie lub stożkowe dno jest parciem hydrostatycznym, czyli znacznie większym niż parcie p_v wg normy [10].



Rys. 1. Jedna z postaci przesklepienia materiału w silosie (a) oraz powstałe podciśnienie p_2 w części poddachowej po likwidacji przesklepienia (b), wg [6]



Rys. 2. Uźebrowane do połowy (a) oraz za pomocą krótkich żeber (b) oraz silosy stalowe o cylindrycznych płaszczach z blach falistych [2].

Wartości parć w silosach, polecane w normie [10], ustalone zostały na podstawie eksperymentalnych badań silosów o płaszczach cylindrycznych, sztywnych w kierunku południkowym. Przeciężenia płaskich den w nieuźebrowanych silosach z blachy falistej wykazane zostały w nielicznych badaniach eksperymentalnych i numerycznych [7], [8].

Wydaje się, że podatność południkową płaszczy silosów z nieuźebrowanej blachy falistej można z pożytkiem wykorzystać w przypadku składowania w nich materiałów o dużej kohezji, do których należą prawie wszystkie rodzaje biomasy. Odpowiednio dobrana podatność płaszcza w kierunku południkowym może zapobiec powstawaniu przesklepień i występującym powszechnie trudnościom w opróżnianiu silosów z biomasy.

W niniejszej pracy przedstawiono podstawowe wyniki własnych badań eksperymentalnych silosów o uźebrowanych i nieuźebrowanych płaszczach z blach falistych z gładkimi lejami stożkowymi. Rozpoznanie rozkładu obciążeń na podatne płaszcze jest szczególnie ważne, aby można było opracować racjonalne rozwiązania konstrukcyjne silosów do składowania biomasy. W pracy przedstawiono również realne zagrożenia bezpieczeństwa lejów i nieuźebrowanych płaszczy z blach falistych, jeśli obciążenia takich silosów wyznaczone są na podstawie normy PN-EN 1991-4:2008 [10], nieuwzględniającej ich specyfiki konstrukcyjnej.

2. Badania eksperymentalne obciążeń silosów z blach falistych

Większość awarii i katastrof stalowych silosów z blach falistych rozpoczyna się od oberwania stożkowego leja (rys. 3), po czym wysypujący się gwałtownie materiał sypki wywołuje duże, krótkotrwałe podciśnienie pod dachem takiego silosu, powodując zniszczenie dachu, a nawet płaszcza. Obrywanie się lejów występuje bardzo rzadko w silosach z blach gładkich. Tak więc, oprócz różnych przyczyn konstrukcyjnych i eksploatacyjnych takich awarii, jedną z nich może być przeciężenie lejów silosów, wywołane znacznie większą podatnością południkową płaszczy z blach falistych w stosunku do podatności płaszczy z blach gładkich [5], [7]. Prowadzone badania obciążeń płaszczy i płaskich

den silosów z blachy falistej [7], [8], [9] wykazują, że wypadkowe pionowe obciążenia F_w nieuźebrowanych płaszczy w takich silosach są znacznie mniejsze niż to się przyjmuje w projektowaniu, korzystając z normy [10]. W takim przypadku płaskie dna tych badanych silosów przejmują większą od normowej [10] wartość pionowego obciążenia F_b , pochodzącą od ciężaru G materiału sypkiego, zgromadzonego w silosie. Wypadkowe obciążenie południkowe (pionowe) płaszcza F_w można wyznaczyć z zależności (1), a wypadkowe pionowe obciążenie dna F_b z zależności (2):

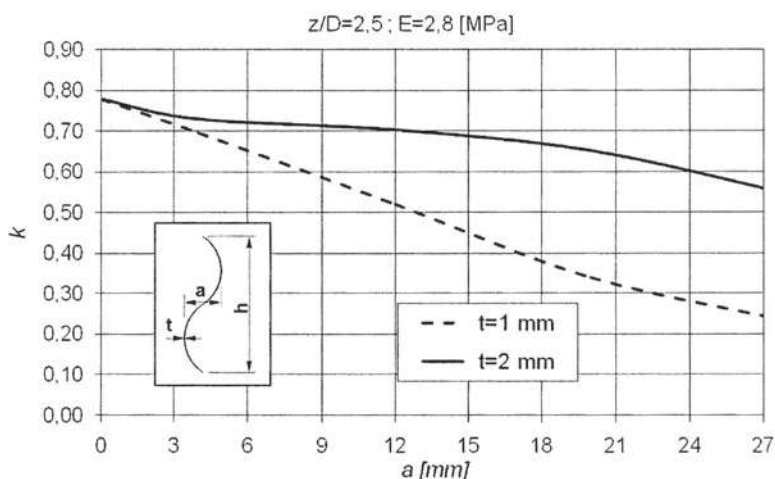
$$F_w = k \times G \quad (1)$$

$$F_b = (1 - k) \times G \quad (2)$$

gdzie K (rys. 4) jest współczynnikiem rozdziału obciążeń w silosie, wyznaczonym doświadczalnie, numerycz-



Rys. 3. Przykłady awarii silosów z blach falistych, które rozpoczęły się od oberwania leja [1], [2]



Rys. 4. Wpływ grubości t blachy i wysokości fali a na wartość współczynnika k wg [7] ($h = 78 \text{ mm}$)

nie lub na podstawie normy [10]. W przypadku stożkowych lejów również dochodzi do ich pionowych przeciążeń, co stwierdzono we własnych badaniach eksperymentalnych [5]. Te przeciążenia są jedną z głównych przyczyn obrywania się lejów w silosach z blach falistych (rys. 3).

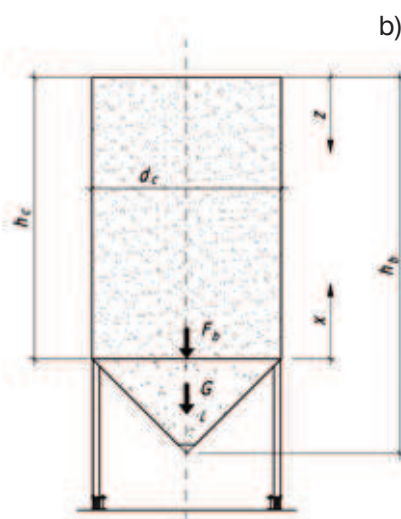
Autorzy wykonali serię badań eksperymentalnych obciążeń silosów o płaszczach z uźebrowanych i nieuźebrowanych blach falistych ze stożkowymi lejami (rys. 5a). Wykonano również badania wpływu materiału wypełniającego silos na południkową sztywność płaszczu z blach falistych (rys. 5b). Silosy miały średnicę płaszczu $d_c = 1800 \text{ mm}$, blachy faliste płaszczu miały grubość $t = 1 \text{ mm}$,

wysokość fali $a = 12 \text{ mm}$ i długość fali $h = 78 \text{ mm}$ (rys. 4). Wpływ zmiany grubości płaszczu t oraz wysokości fali a w badanym silosie na wartość współczynnika rozdziału obciążeń k przedstawiono w [7], a współczynnik ten wyznaczono numerycznie za pomocą programu Plaxis (rys. 4). Badania dotyczyły płaszczu z blach falistych bez południkowego uźebrowania. Silos wypełniony był pszenicą o module sprężystości $E = 2,8 \text{ MPa}$. Średnica silosu wynosiła $D = d_c = 1,80 \text{ m}$, a wysokość jego płaszczu $z = h_c = 4,50 \text{ m}$. W aktualnych badaniach silosy te wypełniane są biomasa. Pionowe obciążenie lejów w badanych silosach (rys. 5) składa się z obciążenia G_L od materiału wy-

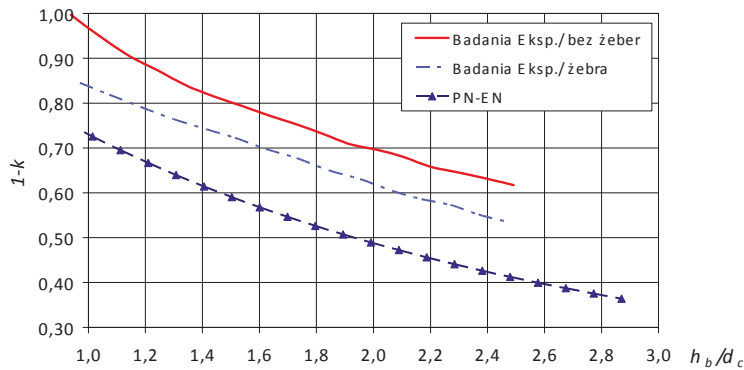
pełniającego lej oraz z obciążenia F_b , pochodzącego od oddziaływania materiału zgromadzonego wewnątrz cylindrycznego płaszczu powyżej leja. Obciążenie F_b wyznaczyć można ze wzoru (2). Kąt pochylenia leja w każdym przypadku wynosił $\alpha = 45^\circ$. Konstrukcje lejów oparte były na 3 niezależnych słupach, pod którymi zamontowane były siłomierze do bezpośredniego pomiaru sumarycznego obciążenia pionowego lejów $F_b + G_L$. Niezależne oparcie na 3 słupach miały również płaszcze silosów z blach falistych, pod którymi umieszczone były siłomierze do bezpośredniego pomiaru południkowego obciążenia płaszczu F_w .

Podczas badań eksperymentalnych silosów o płaszczach z blach falistych (rys. 5a) stosowano uźebrowanie na całej wysokości płaszczu $x = h_c = 4,5 \text{ m}$, na wysokości $x = 0,5 h_c$, na wysokości $x = 0,25 h_c$ lub nie stosowano żadnego południkowego uźebrowania. Wyniki badań pokazują wyraźnie (rys. 6), że wartość obciążenia pionowego leja F_b , reprezentowanego we wzorze (2) przez współczynnik $(1-k)$, jest znacznie większa w silosach z blach falistych, niż to wynika z uregulowań normy [10]. Wartość przeciążenia leja siłą F_b w badanych silosach wynosiła nawet około 50% w nieuźebrowanych płaszczach i około 30% w silosach uźebrowanych na całej wysokości płaszczu. Norma [10] nie uwzględnia niestety wpływu podatności południkowej cylindrycznych płaszczu na wartości obciążeń den (lejów) i płaszczu silosów. Z tego faktu mogą wynikać bardzo groźne konsekwencje dla bezpieczeństwa nieuźebrowanych silosów z blach falistych. Można jednak ten fakt wykorzystać świadomie i z dobrym skutkiem do poprawy warunków eksploatacji silosów na biomasa.

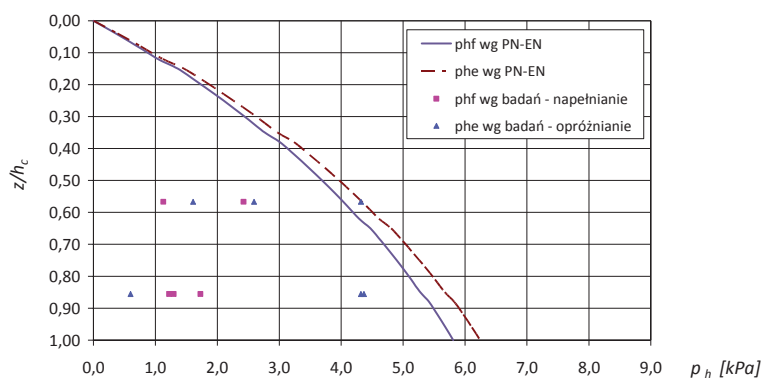
Własne badania eksperymentalne wykazały bowiem wyraźnie, że w silosach o płaszczach z blach falistych może dochodzić do znacznych pionowych przeciążeń lejów (rys. 6), co może skutkować ich obrywaniem i poważnymi katastrofami budowlanymi (rys. 3). Gdy jednak uwzględ-



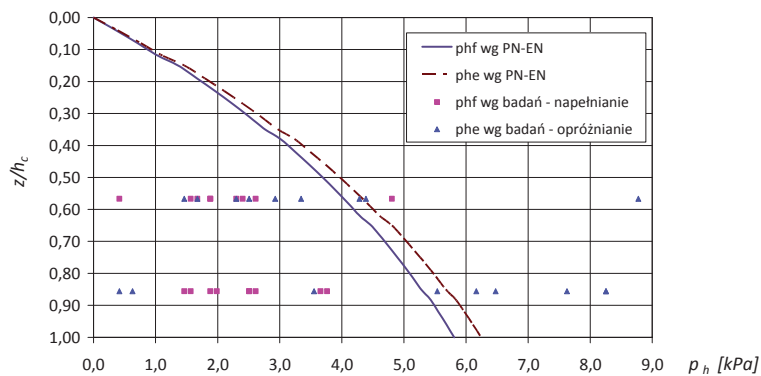
Rys. 5. Badane silosy w skali naturalnej (a) oraz schemat pionowego obciążenia F_b i G_L lejów w badanych silosach (b)



Rys. 6. Wartości współczynnika (1-k) z badań eksperymentalnych dla płaszczu z blach falistych bez żeber i tego samego płaszczu z żebrami oraz wartości (1-k) obliczone wg PN-EN [10]



Rys. 7. Wartości parci poziomych p_h w silosie o smukłości $h_b/d_c = 1,5$ o uzeźbrowanym płaszczu na całej wysokości obliczone wg PN-EN [10] oraz pomierzone podczas badań eksperymentalnych



Rys. 8. Wartości parci poziomych p_h w silosie o smukłości $h_b/d_c = 1,5$ o nieuzeźbrowanym płaszczu z blach falistych wg PN-EN [10] oraz pomierzone podczas badań eksperymentalnych

ni się ten fakt przy projektowaniu takich lejów lub zrezygnuje się z lejów na rzecz silosów płaskodennych, to może on wpłynąć korzystnie na opróżnianie silosów z biomasy. Zanik parcia na dno (przesklepienia) jest utrudnieniem w opróżnianiu silosu, a duże parcie pionowe na dno jest w tym przypadku korzystne. Jeśli zwiększa się sumaryczne pio-

nowe obciążenie leja F_b to zmniejsza się jednocześnie sumaryczne pionowe obciążenie płaszczu F_w , co uwzględnione jest we wzorach (1) i (2). To mniejsze obciążenie F_w w stosunku do obciążenia wg normy [10] nie jest zagrożeniem bezpieczeństwa płaszczu z blach falistych. Podczas badań eksperymentalnych mierzono pośrednio wartości pozio-

mych parci p_h na uzeźbrowane i nieuzeźbrowane płaszcze silosów, wykorzystując w tym celu tensometry elektrooporowe. Pomiarów dokonywano w dwóch poziomach dolnej części płaszczy silosów w 3 punktach obwodu. Stwierdzono, że w uzeźbrowanych płaszczu, parcia poziome przy napełnianiu p_{hf} oraz przy opróżnianiu p_{he} nie przekraczały wartości normowych [10], co pokazano na rysunku 7.

Badania uzeźbrowanego płaszczu silosu na całej jego wysokości wykazały, że w niektórych stanach eksploatacyjnych na samym początku opróżniania silosu może dochodzić do około 90 % przekroczenia wartości parci bocznych p_{he} (rys. 8) w stosunku do wartości uzyskanych wg normy [10]. Zauważono również dużą nierównomierność tych parci na obwodzie płaszczu. Uzyskane wyniki badań są niepokojące, gdyż wskazują na możliwości wystąpienia znacznych obwodowych przeciążeń nieuzeźbrowanych lub częściowo uzeźbrowanych płaszczy z blach falistych podczas opróżniania silosów. Najstańszymi elementami takich cylindrycznych płaszczy są pionowe styki śrubowe arkuszy blach, a zbyt duże siły obwodowe w tych stykach cienkich blach mogą prowadzić do nagłego lub stopniowego procesu uszkodzenia tych śrubowych połączeń. Owalizacja otworów pod śruby w pionowych stykach falistych blach płaszczu o typowej grubości $t = 1,0 \div 1,5$ mm jest dość często spotykana. Badania wskazały na jedną z głównych jej przyczyn, którą są duże wartości parci poziomych p_{he} na płaszcz silosu, znacznie większe niż to wynika z normy [10].

3. Uwagi końcowe

Cylindryczne silosy stalowe z blach falistych należą do tych konstrukcji, w których występują dość często różne awarie i katastrofy [1], [2], [3], [4]. Awaria takich silosów rozpoczyna się najczęściej od oberwania się lejów (rys. 3), co wynikać m.in. może z ich przeciążenia w kierunku pionowym. W pracy przedstawiono wyniki eks-

perymentalnych badań obciążeń F_b stożkowych lejów silosów o płaszczach z blach falistych, które wyraźnie wskazują na to, że wartości tych obciążeń mogą być znacznie większe niż przyjmowane w projektowaniu na podstawie normy [10]. Zagadnienia te były już częściowo sygnalizowane w pracach [8] i [9].

Wyniki badań eksperymentalnych pokazują, że w dolnych częściach nieuzębrowanych lub tylko częściowo uzębrowanych cylindrycznych płaszczu silosów mogą występować znacznie większe niż normowe [10] parcia poziome p_{he} na samym początku procesu opróżniania silosu. Obwodowe siły rozciągające w płaszczu silosu, wywołane tym zwiększonym obciążeniem poziomym, mogą spowodować uszkodzenie lub zniszczenie połączeń śrubowych arkuszy falistych blach płaszczu.

Przedstawione wybrane wyniki badań wpływu podatności południkowej płaszczu z nieuzębrowanych blach falistych na zmniejszenie ich

poziomego obciążenia mogą stanowić podstawę dalszych prac badawczych nad opracowaniem takiej konstrukcji silosów [8], które będą przydatne do bezawaryjnego składowania materiałów kohezyjnych, do których należą prawie wszystkie rodzaje biomasy.

Niezbędne są dalsze badania obciążeń różnych konstrukcji silosów z blach falistych i wprowadzenie takich regulacji w normie [10] oraz w normach związanych [11], [12], które uwzględnią wpływ podatności południkowej płaszczu na wartości obciążeń w komorach silosów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hołała E., Awaryjność silosów z blachy falistej. Materiały Budowlane, nr 2/2006
 [2] Hołała E., Remonty i wzmocnienie konstrukcji budowlanych, XXIII Ogólnopolska Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Szczyrk, 5–8 marca 2008, T. 1, s. 443–484
 [3] Pasternak H., Bodarski Z., Hołała E., Steel Silos – Education by Analysing Failures. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 46, pp. 340, 1998

- [4] Pasternak H., Hołała E., Vayas I., Schäden an Stahlsilos – weitere Bepispiele. Bauingenieur 2002, Bd 77, nr 3, s. 108–112
 [5] Hołała E., Pawłowski K., Awaryjne przeciążenia płaszczu i lejów w silosach z blachy falistej. Materiały XXV Konferencji Naukowo-Technicznej „Awaryje Budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje, 24–27 maja 2011
 [6] Hołała E.: Nośność graniczna nieuzębrowanych cylindrycznych płaszczu silosów stalowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
 [7] Hołała E., Zambrowicz M., Obciążenia płaszczu i lejów w silosach z blachy falistej. Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa. Olsztyn 2006, s. 173–178
 [8] Hołała E., Zambrowicz M., Problemy składowania wybranych rodzajów biomasy w silosach z blachy falistej. Przegląd Budowlany, nr 5/2010, s. 97–100
 [9] Molenda M., Horabik J., Thompson S. A., Ross I. J., Grain loads on smooth- and corrugated-wall model silos. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, nr 419/2001
 [10] PN-EN 1991-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki
 [11] PN-EN 1993-1-6:2009 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych
 [12] PN-EN 1993-4-1:2009 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 4-1: Silosy



construction
Arnfried Pagel Pers., Ing



- ▶ zaprawy do podlewek
- ▶ naprawa i ochrona betonu
- ▶ posadzki przemysłowe

AP construction

ul. Ogrody Zamkowe 21, 55-300 Środa Śląska
tel./fax +48 71 315 33 31, info@apconstruction.pl
kom. 691 699 200, 795 128 920

www.apconstruction.pl