

dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWi*
mgr inż. Mateusz Kuśnierek*
mgr inż. Agata Aniszczyk*
dr inż. Kamil Pawłowski**

Niekonwencjonalne konstrukcje silosów do składowania biomasy

Unconventional constructions of silos for biomass storage

Streszczenie. W artykule zaprezentowano niekonwencjonalne konstrukcje do składowania zbrylających się materiałów, do których należy również biomasa. Konstrukcje te opracowano na podstawie wyników badań silosów walcowych o podatnych i wiotkich płaszczach. Przedstawiono konstrukcje podatnych walcowych powłok płaszczy silosów z nieuźbrowanych blach falistych, które ułatwiają przepływ materiału w kierunku ich płaskich den podczas ich opróżniania. Najlepsze efekty w uzyskiwaniu przepływu masowego podczas opróżniania uzyskano w silosach o wiotkich, tkaninowych płaszczach walcowych. **Słowa kluczowe:** powłoka metalowa, blacha falista, obciążenia silosu, tkanina techniczna.

Abstract. The unconventional constructions for selfprilling materials e.g., biomass have been presented herein. The constructions have been developed on the base of research results obtained for cylindrical siloses having a flexible and flabby shells. A cylindrical flexible silos shells from unribbed corrugated sheets, in which the flow of materials towards the silo flat bottom is facilitated have been presented. The best effect of the mass flow efficiency have been reached in cylindrical silos with flabby shells.

Keywords: metal shell, corrugated sheet, silo loads, technical fabric.

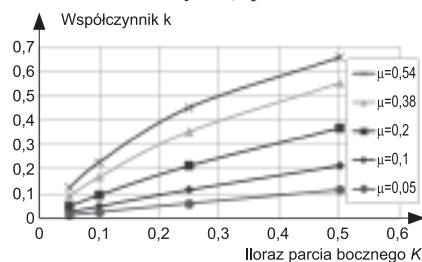
W elektrowniach węglowych dość powszechnie stosuje się biomasę jako paliwo w kotłach energetycznych, spalane razem z węglem. Ważnym problemem jest właściwe magazynowanie biomasy, tak aby nie traciła wartości energetycznej, nie zanieczyszczała otoczenia i nie stanowiła zagrożenia powstania pożaru lub wybuchu. Najlepszym rozwiązaniem byłoby jej magazynowanie w tradycyjnych silosach, ale istotną przeszkodą w ich szerokim stosowaniu są problemy z ich opróżnianiem z łatwo zbrylających się i kohezyjnych peletów drzewnych, słomianych, słonecznikowych, rzepakowych i innych. Poszukiwania konstrukcji silosu, w którym nie będzie dochodziło do groźnych przesklepień składowanego materiału (biomasy) i zawsze zostanie zapewniony przepływ masowy podczas procesu opróżniania, pozwoliły na opracowanie dwóch koncepcji konstrukcyjnych, przedstawionych w tym artykule. Naszym zdaniem wdrożenie tych konstrukcji do stosowania pozwoli na bezzakłócenową eksploatację silosów nawet w przypadku magazynowania trudnych sypliwych materiałów, w tym biomasy.

Zapewnienie przepływu masowego w komorze silosu jest skutecznym sposobem na bezzakłócenowy proces opróżniania silosów płaskodennych, gdyż w takim przypadku składowany materiał zawsze będzie się przemieszczał w kierunku płaskiego dna, z którego łatwo go wyładować za pomocą powszechnie dostępnych systemów przenośników ślimakowych. Przepływ całego słupa materiału w komorze silosu (przepływ masowy) byłby zawsze możliwy, gdyby jego płaszcz nie przejmował istotnej części pionowego obciążenia od ciężaru G materiału wypełniającego, a to obciążenie przejmowałoby prawie wyłącznie płaskie dno. Jeśli przez P_w oznacza się wypadkowe obciążenie pionowe płaszcza silosu od ciężaru materiału wypełniającego (wynikające z tarcia o ścianę), to można zapisać współczynnik rozdziału obciążenia k jako:

$$k = P_w / G \quad (1)$$

Teoretyczna wartość tego współczynnika mieści się w zakresie $0 \leq k \leq 1,0$ i w realnych silosach wynosi $k = 0,4 \div 0,6$. Jeśli wartość współczynnika k będzie zbliżała się do 1,0, to oznacza, że prawie cały składowany materiał jest niejako zawieszony na płaszczu (np. przesklepiony), a jeśli $k \approx 0$, to w tej korzystnej sytuacji cały ciężar materiału G obciąża wyłącznie dno silosu. Jeśli współczynnik tarcia materiału (np. biomasy) o ścianę silosu μ byłby bar-

dzo mały ($\mu \approx 0,05$), to nawet przy dość dużej wartości ilorazu parcia bocznego K , współczynnik $k \leq 0,1$ (rysunek 1), a taką wartość naszym zdaniem w praktyce można uznać za wystarczającą do zapewnienia bezzakłócenowego przepływu biomasy i innych materiałów w kierunku płaskiego dna silosu. Należy więc poszukiwać takich



Rys. 1. Wartość współczynnika k w funkcji K w smukłym silosie stalowym wg [1]

rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych, w których uzyska się wartość współczynnika $k \leq 0,1$. Zaznaczyć trzeba, iż dotyczy to silosów płaskodennych, gdyż w silosach lejowych naturalną przeszkodę w swobodnym przepływie materiału w kierunku otworu wyspowego stanowi sama konstrukcja leja o zbieżnych ścianach.

Płaskodenne silosy walcowe o podatnych ścianach w kierunku południkowym

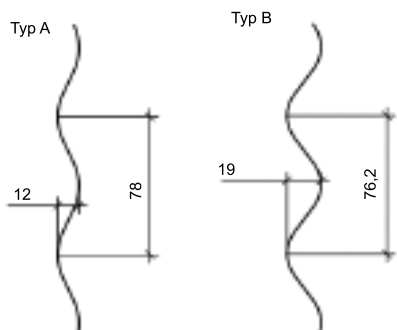
Jednym ze sposobów zmniejszania wartości k jest zastosowanie w silosach płaszczy podatnych w kierunku południkowym,

* Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

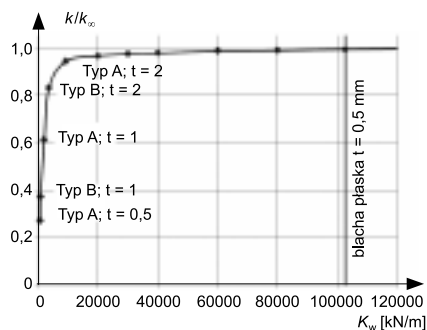
** Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji

a więc o małej sztywności K_w w tym kierunku. W pracach [2, 3] wykazano, że dość dobre efekty w zmniejszaniu współczynnika k uzyskuje się przez wykonanie walcowego płaszczu silosu z blach falistych o poziomym przebiegu fal, bez zastosowania pionowego uźebrowania. W przypadku blachy typu A (rysunek 2) grubości $t = 1$ mm, można uzyskać ok. 60% redukcję współczynnika k (rysunek 3) w stosunku do współczynnika k_{∞} , który wyznaczony z wzoru (1), dotyczy przypadku płaszczu z płaskiej blachy, kiedy można przyjąć, że południkowa sztywność płaszczu $K_w \rightarrow \infty$. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki analizy numerycznej programem Plaxis redukcji wartości pionowych obciążeń płaszczu walcowego silosu o zmiennej sztywności południkowej K_w , oznaczonej jako k/k_{∞} . Płaskodenny silos miał średnicę $d_c = 1,8$ m, wysokość $h_c = 7,2$ m i wypełniony był pszenicą o module sprężystości $E_{grain} = 3000$ kPa.

Zmniejszanie grubości t blachy falistej oraz zwiększanie wysokości fali d (Typ A: $d = 12$ mm, Typ B: $d = 19$ mm – rysunek 2) wpływa bardzo korzystnie na zmniejszanie udziału nieuźebrowanego płaszczu silosu w przejmowaniu obciążeń pionowych i poprawę przepływu składowanego materiału w kierunku dna (rysunek 3). Trzeba się jednak liczyć z dużym zginaniem nieuźebrowanych fal blachy płaszczu i ryzykiem ich upla-



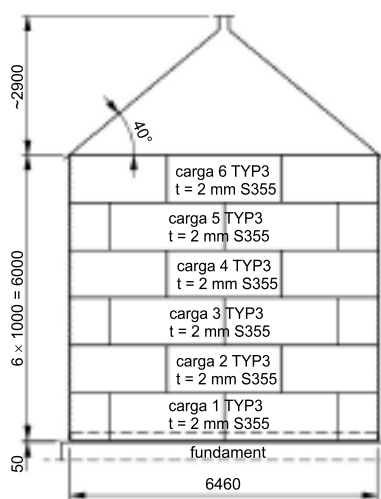
Rys. 2. Geometria analizowanych blach falistych



Rys. 3. Wpływ południkowej sztywności walcowego płaszczu K_w na redukcję pionowego obciążenia płaszczu silosu k/k_{∞} (typ A i typ B jak na rysunku 2)

stycznienia, dlatego w praktyce dość trudno uzyskać wartość współczynnika $k < 0,2$, przy czym konieczne jest wtedy zastosowanie stali o wysokiej wytrzymałości (S460).

Na rysunku 4 przedstawiono geometrię jednego z serii silosów na biomasę o pojemności $V = 220$ m³, którego konstrukcję opracowaliśmy w ramach realizacji grantu badawczego NCN o numerze rejestracyjnym: N N506 099840. W tym przypadku zastosowano blachę falistą (TYP3) o wysokości fali $d = 18$ mm i długości $l = 76$ mm. Grubość blachy ze stali S355



Rys. 4. Płaskodenny silos $V = 220$ m³ z blach falistych o współczynniku $k \approx 0,24$

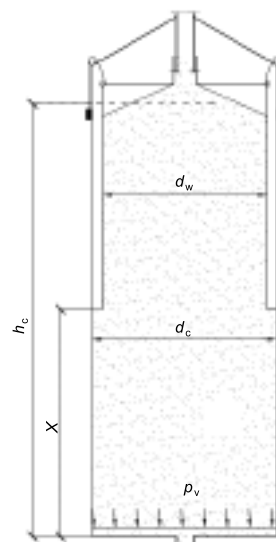
musiała wynosić 2 mm, aby zapewnić spełnienie warunku jej nośności z uwzględnieniem zginania fal. W tym przypadku uzyskano współczynnik $k \approx 0,24$, a więc ponad dwukrotnie mniejszy, niż gdy zastosowano pionowe uźebrowanie płaszczu. Jest to dość dobry rezultat, choć nie w pełni satysfakcjonujący.

Walcowe silosy o wiotkich płaszczach z tkanin technicznych

Z uwagi na trudności w uzyskaniu pożądanego redukcji pionowego obciążenia ($k < 0,1$) nieuźebrowanego płaszczu silosu z blach falistych rozważano zastosowanie w walcowych silosach dodatkowych płaszczu z wiotkich tkanin technicznych (np. poliamidowych). Jeśli takie płaszcze (wkładki do silosów) nie zostaną podwieszone podczas opróżniania za górną krawędź, to będą się one swobodnie przemieszczać razem z wypływającym materiałem w dół, a więc uzyska się południkową sztywność płaszczu $K_w = 0$ oraz wartość współczynnika pionowego obciążenia płaszczu $k = 0$. Walcowy płaszcz silosu, całkowicie wiotki w kierunku południko-

wym, nie będzie mógł przenosić żadnego obciążenia pionowego, a więc tym samym nie będzie stanowił przeszkody w swobodnym przepływie sypkiego lub kohezynego (biomasy) materiału w kierunku dna silosu.

Zastrzeżone szczegóły techniczne częściowego mocowania wiotkiego płaszczu tkaninowego w części poddachowej silosu oraz jego podnoszenia do góry po opróżnieniu silosu przedstawione są w opisach, zawartych w zgłoszonych do Urzędu Patentowego RP wynalazkach pod numerami: P. 402661 i P. 402662. Na rysunku 5 przedstawiono ogólny schemat konstrukcji silosu, której wyniki badania eksperymentalnego w skali naturalnej przedstawiono w [1]. W walcowym silosie średnicy $d_c = 1,8$ m zamontowano dodatkowy wiotki płaszcz z tkaniny poliamidowej średnicy $d_w = 1,6$ m. Wysokość płaszczu stalowego silosu wynosiła $h_c = 3,9$ m, a „podwieszony” pod dachem płaszcz tkaninowy miał różną wysokość, sięgając swą dolną krawędzią na wysokość x od płaskiego dna. Jak to wykazano w [1], zadowalające rezultaty ($k \rightarrow 0$) uzyskiwano przy pełnej długości tkaninowego płaszczu, a więc dla $x = 0$. Podczas badań stwierdzono, że parcie materiału składowanego na płaskie dno p_v jestarciem hydrostatycznym, a parcie poziome na płaszcz jest większe niż w silosach o sztywnych płaszczach.



Rys. 5. Silos z wewnętrznym płaszczem tkaninowym

Należy zaznaczyć, że wytrzymałość tkanin w pewnym stopniu ogranicza stosowanie wiotkich płaszczu w silosach. Mogą więc wystąpić trudności w stosowaniu tych płaszczu w silosach o dużej średnicy i dużej wysokości. Są już jednak w przygotowaniu skuteczne rozwiązania tego problemu.

Podsumowanie

Podatne konstrukcje walcowych nieuzbrojonych płaszczy płaskodennych silosów w wielu przypadkach mogą przyczynić się do ułatwienia opróżniania silosów, w których składowana jest biomasa o niezbyt dużej wilgotności. Zastosowanie wiotkich, tkaninowych płaszczy w silosach na materiały trudno sypliwie (w tym biomase) może być od dawna poszukiwanym rozwiązaniem licznych problemów eksploatacyjnych, polegających na przesklepianiu się materiałów składowanych w tradycyjnych silosach oraz na poważnych trudnościach w ich rozładunku, często skutkujących poważnymi awariami

tych konstrukcji. Szerokie zastosowanie wiotkich płaszczy wymaga jeszcze wielu badań. Celowe byłoby wykorzystanie nowoczesnych metod badań (optoelektronicznych, tomografii pojemnościowej i innych [4 ÷ 6]) zachowania się sypkiego ośrodka w wiotkich płaszczy silosów do oceny skuteczności proponowanych rozwiązań.

Literatura

- [1] Hotała E., Aniszczuk A.: Prototypowa konstrukcja silosu o wiotkim płaszczy do składowania biomasy. Materiały Budowlane. 2013, nr 5, s. 52 – 54.
 [2] Hotała E., Pawłowski K.: Badania stalowych silosów do składowania biomasy. Przegląd Budowlany. 2012, nr 5, s. 14 – 18.

[3] Pawłowski K.: Obciążenia stożkowych lejów i cylindrycznych płaszczy silosów z blachy falistej od składowanego zboża, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Praca doktorska, Raport serii PRE 07/2013, Wrocław 2013.

[4] Buick J. M., Chavez-Sagarnaga J., Zhing Z., Ooi J. Y., Pankaj D. M., Cambel D. M., Geated C. A.: Investigation of silo-honking: slip-stick excitation and wall vibration. Journal of Engineering Mechanics ASCE, 2005, 131 (3), 299 – 307.

[5] Niedostatkiewicz M., Tejchman J.: Nowe bezinwazyjne metody pomiarowe zmian porowatości w materiałach sypkich. Przegląd Budowlany 5/2007, s. 28 – 31.

[6] Niedostatkiewicz M.: Opis mechanizmu powstawania lokalizacji odkształceń wewnątrz materiału sypkiego podczas opróżniania silosu na podstawie pomiarów metodą PIV (Particle Image Velocimetry), Acta Agrophysica, 2010, 16 (2), 377 – 390.

Prof. Dr.-Ing. habil. Piotr Noakowski*

Dipl.-Ing. Andreas Harling*

Msc Bartosz Michalak*

Szczelność płyty fundamentowej pod maszynownią

Zasady właściwego wymiarowania

Tightness of a foundation slab under an engine house, rules of the correct dimensioning

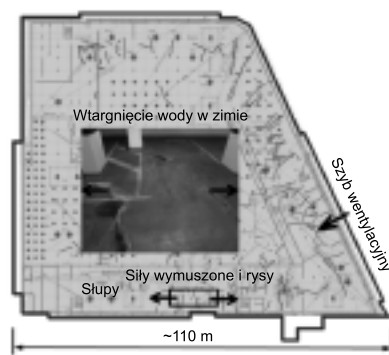
Streszczenie. Przedmiotem pracy jest analiza rozległej płyty fundamentowej, która stanowi spód podpiwniczenia maszynowni energetycznej. Płyta ta wbrew wymogom nie stanowi zapory dla parcia wody gruntowej. Powodem awarii jest jej niedostateczne zbrojenie wynikające z błędnego wymiarowania. W pracy pokazano, na czym ten błąd polega i jak ma wyglądać właściwe wymiarowanie płyty.

Słowa kluczowe: płyty fundamentowe, biała wanna, szerokość rys, nieliniowe obliczenia.

Abstract. The subject of the paper is analysis of a large foundation slab which makes up the bottom of the engine house basement. Against the rules, the slab did not constitute a barrier to the pressure of the ground water. The damage cause was insufficient reinforcement resulting from a poor structural design of the slab. The paper explains the committed mistakes and shows how the correct slab design should be carried out.

Keywords: foundation slabs, white tank, crack width, non/linear computations.

Na obrzeżach rozległej płyty fundamentowej (rysunki 1, 2), należącej do białej wanny pod blokiem energetycznym, wystąpiły liczne rysy z przeciekami wody gruntowej. Awaria jest wynikiem wyężenia niedostatecznie zbrojonej płyty parciem wody gruntowej oraz siłami wymuszonymi wzbudzanymi zimnym powietrzem z bocznych szybów wentylacyjnych. Podstawowe właściwości płyty i główne oddziaływania na nią są następujące:



Rys. 1. Płyta fundamentowa – wzbudzenie naprężeń rozciągających wskutek ochłodzenia; powstawanie rys w czasie mroźnych zim oraz wtargnięcie prącej wody w okresach zimowych w otwarte rysy

- materiały: beton C 30/37 WU, stal S 500;
- wymiary: grubość $h = 1,0$ m;
- zbrojenie: średnica $d_s = 20$ mm; rozstaw $s = 12$ cm, otulina $c = 4,5$ cm;
- powłoka: system OS-8;
- parcie wody: wartość efektywna $p = 40$ kN/m²;
- skurcz betonu: równomierny rozkład $\epsilon = -0,05\%$ (-5 K);
- temperatura: różnica $\Delta T_G = +5$ K do -10 K, spadek $\Delta T_m = -5 + \Delta T_G/2$.

W dalszych analizach płyty wykorzystano własne metody nieliniowej statyki konstrukcji żelbetowych [5 – 8], które weszły do norm [1 – 3] i znalazły zastosowanie przy rozwiązywaniu trud-

* Technische Universität Dortmund; Exponent Industrial Structures, Düsseldorf