

dr hab. inż. Jakub Marcinowski, prof. UZ¹⁾

Wpływ gwałtownej zmiany temperatury na stan wyężenia silosów stalowych

Influence of sudden temperature changes on state of effort of steel silos

DOI: 10.15199/33.2015.09.41

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. Zmiana temperatury może być istotnym czynnikiem wpływającym na stan wyężenia ścian silosów stalowych, a w pewnych okolicznościach może się stać przyczyną awarii tych konstrukcji. Punkt 5.6 normy obciążeniowej EN 1991-4:2006 zawiera zapisy dotyczące wzrostu naprężeń w elementach konstrukcyjnych silosu spowodowanego różnicą temperatury materiału składowanego i płaszczu silosu. Norma podaje wzór na wzrost parcia poziomego w silosie wypełnionym materiałem sypkim w warunkach pojawienia się różnicy temperatury między ścianami silosu a materiałem składowanym. W artykule przedstawiono wyprowadzenie tego wzoru oraz dyskusję na temat określenia efektywnego modułu sztywności materiału składowanego E_{sU} . Ilustracją rozważań teoretycznych zawartych w artykule są wybrane przykłady analiz wzrostu wyężenia ściany silosu w efekcie jej ochłodzenia. Rozważono silosy o różnej smukłości oraz różne współczynniki tarcia materiału składowanego o ścianę. Obliczenia wykazały, że gwałtowne ochłodzenie ściany silosu stalowego może skutkować wzrostem parcia poziomego nawet o 27% i w ostateczności awarią.

Słowa kluczowe: silosy stalowe, spadek temperatury, wzrost parcia poziomego, rozwiązanie analityczne.

Abstract. The temperature change can be an essential factor affecting the state of effort of steel silo walls. In some circumstances it could even be the main cause of the failure of such structures. The clause 5.6 of the load standard EN 1991-4:2006 includes provisions which refer to the stress increase in structural members evoked by the temperature difference between the silo wall and the stored material. The standard presents the formula on increase of horizontal pressure as a result of the temperature difference between the silo wall and the stored material. The derivation of this formula and the discussion on the determination of the unloading effective elastic modulus of the stored solid E_{sU} were presented in this work. Theoretical considerations are exemplified by chosen examples showing the effort increase of the silo wall as a result of its cooling. Silos of different slendernesses and of different coefficients of wall friction were considered. Calculations have revealed that the sudden temperature drop of the silo wall can lead even to the 27% increase of horizontal pressure and consequently to its failure.

Keywords: steel silos, temperature drop, increase of horizontal pressure, analytical solution.

Każdy projektant silosów bez wahania wymieni główne czynniki wpływające na stan wyężenia projektowanych przez siebie stalowych konstrukcji powłokowych, ale rzadko wśród tych czynników pojawi się zmiana temperatury, mimo iż występuje ona w normie obciążeniowej [1]. Punkt 5.6 tej normy zawiera zapisy dotyczące wzrostu naprężeń w elementach konstrukcyjnych silosu spowodowanego różnicą temperatury materiału składowanego i płaszczu silosu.

Zjawisko wzrostu naprężeń w ścianach silosu na skutek zmiany temperatury jest przedmiotem wielu współczesnych publikacji dotyczących zarówno silosów stalowych, jak i żelbetowych. Warto w tym kontekście wspomnieć prace prof. Łapko ze współpracownikami ([2] i [3]). Carson i Holmes w pracy [4] wymieniają zmianę temperatury jako istotny czynnik wyężenia konstrukcji silosu i prezentują przykład awarii nowego silosu po kilkutygodniowym okresie zasypiania popiołem lotnym. Ekspertyza wykazała, że powodem zniszczenia silosu były cykliczne, dobowe wahania temperatury. Podczas dnia silos się nagrzewał, ściany się rozsze-

rzały, a materiał składowany ulegał konsolidacji, natomiast podczas nocnych spadków temperatury kurcząca się ściana silosu natrafiała na skonsolidowany materiał i nie była w stanie przyjąć kształtu pierwotnego. Stopniowo rosły naprężenia rozciągające aż do stanu rozerwania śrubowych styków blach (fotografia).

W artykule przedstawiono szczegółową analizę normowych zaleceń określania wzrostu parcia poziomego na skutek wystąpienia różnicy temperatury ściany silosu i materiału składowanego. Przeprowadzono analizę parametryczną, której wyniki pokazują znaczny wzrost parcia poziomego i tym samym wyjaśniają przyczyny ewentualnych awarii.

Normowy wzór na wzrost parcia poziomego

Norma [1] podaje wzór na wzrost parcia poziomego w silosie walcowym o promieniu r , napełnionym materiałem o efektywnym module sprężystości E_{sU} zależnym od parcia pionowego na danej głębokości z:

$$p_{HT} = C_T \alpha_w \Delta T \frac{E_w}{\frac{r}{t} + (1-\nu) \frac{E_w}{E_{sU}}} \quad (1)$$

¹⁾ Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska; e-mail: j.marcinowski@ib.uz.zgora.pl

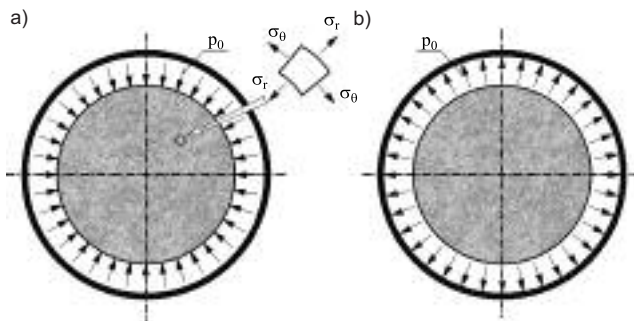


Silos zniszczony na skutek cyklicznych zmian temperatury [4]
Silos failure as a result of cyclic temperature changes [4]

gdzie:

α_w – współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej materiału silosu (dla stali $12 \cdot 10^{-6}$);
 ΔT – różnica temperatury między ścianą silosu a materiałem zasypowym;
 t – grubość ściany silosu;
 E_w – moduł sprężystości ściany silosu;
 ν – współczynnik Poissona materiału zasypowego (można przyjąć $\nu = 0,3$).

Prześledźmy wyprowadzenie tego wzoru. Na rysunku pokazano ośrodek sprężysty (walec) oraz otaczającą go tuleję. Oba te ośrodki faktycznie przylegają do siebie, a jedynie na potrzeby przeprowadzonego tu rozumowania zo-



Wzajemne oddziaływanie płaszcza silosu i materiału składowanego

Mutual interactions of the silo wall and the storage material

stały na rysunku oddzielone. Przedmiotem poszukiwań jest wartość wzajemnego oddziaływania tych ośrodków wywołana spadkiem temperatury tulei.

Z rozwiązania klasycznego zadania Lamego (problem rurowy grubościenniej [5]) otrzymujemy stałe wartości naprężeń promieniowych i obwodowych w ośrodku walcowym od działania ciśnienia zewnętrznego p_0 (rysunek a):

$$\sigma_r = -p_0, \quad \sigma_\theta = -p_0 \quad (2)$$

Odształcenia obwodowe w tym ośrodku

$$\varepsilon_\theta = u/r, \quad \varepsilon_\theta = (1/E)(\sigma_\theta - \nu\sigma_r) = (-p_0/E)(1 - \nu) \quad (3)$$

gdzie: u – przemieszczenie promieniowe; E i ν – stałe materiałowe ośrodka.

Z zależności (3) otrzymujemy:

$$u(r) = (-p_0/E) \cdot r(1 - \nu) \quad (4)$$

Zależność ta wyraża zmianę długości promienia walca poddanego działaniu ciśnienia zewnętrznego. Obwód tulei, na skutek wyłącznego działania zmiany jej temperatury (ochłodzenie ΔT) przyjmuje wartość:

$$L_k = 2\pi r(1 - \alpha\Delta T) \quad (5)$$

Jeżeli na tuleję działa dodatkowo ciśnienie wewnętrzne (rysunek b), to pojawią się w niej rozciągające naprężenia obwodowe o wartości:

$$\sigma_\theta = (p_0/t) r \quad (6)$$

oraz towarzyszące im odkształcenia obwodowe:

$$\varepsilon_\theta = (p_0/E_w t) r \quad (7)$$

gdzie: E_w – moduł Younga tulei.

Zmiana długości obwodu tulei, na skutek działania ciśnienia wewnętrznego, będzie zatem równa:

$$\Delta L = 2\pi r\varepsilon_\theta = 2\pi r (p_0/E_w t) r \quad (8)$$

Długość obwodu tulei poddanej ochłodzeniu i działaniu ciśnienia wewnętrznego wyniesie:

$$2\pi r (1 - \alpha\Delta T) + 2\pi r [p_0/(E_w t)r] = 2\pi r_k \quad (9)$$

gdzie: r_k – końcowy promień tulei.

Z zależności tej otrzymujemy następujące wyrażenie na zmianę promienia tulei:

$$r - r_k = r\alpha\Delta T - r^2 [p_0/(E_w t)] \quad (10)$$

Warunek zgodności przemieszczeń na granicy tulei i walca (por. 4) prowadzi do równości:

$$(p_0/E) \cdot r(1 - \nu) = r\alpha\Delta T - r^2 [p_0/(E_w t)] \quad (11)$$

z której, po względnie prostych przekształceniach, otrzymujemy wyrażenie na ciśnienie na granicy kontaktu tuleja-walec:

$$p_0 = \alpha\Delta T \frac{E_w}{\frac{r}{t} + (1-\nu)\frac{E_w}{E}} \quad (12)$$

We wzorze tym E jest modułem Younga ośrodka sprężystego w postaci walca o promieniu r , a E_w modułem Younga tulei ograniczającej ten ośrodek i poddanej ochłodzeniu o ΔT . Wyprowadzony wzór na wzrost ciśnienia na granicy dwóch ośrodków różni się od wzoru normowego tylko

ZBIORNIKI NA MATERIAŁY SYPKIE I CIECZE

współczynnikiem korekcyjnym C_T (por. wzór (5.101) z normy [1]). Wartość tego współczynnika zależy od sposobu określenia wartości efektywnego modułu sprężystości E_{su} składowanego w silosie materiału i wynosi 1,2, jeśli moduł sprężystości E_{su} był określony na podstawie badań lub 3,0, jeśli moduł sprężystości E_{su} był szacowany na podstawie wartości gęstości materiału i parcia pionowego na analizowanej głębokości.

Sposób określenia efektywnego modułu sprężystości E_{su} opisuje norma [1] w p. C10. Poza szczegółową procedurę eksperymentalną norma proponuje także pośrednie oszacowanie tej wielkości:

$$E_{su} = \chi P_{vft} \quad (13)$$

gdzie:

χ – współczynnik modułu wzajemnego oddziaływania;
 P_{vft} – pionowe parcie w materiale zasypowym na poziomie z.

Wartość współczynnika χ można określić na podstawie ciężaru objętościowego materiału składowanego γ ze wzoru (C. 16) z [1]:

$$\chi = 7\gamma^{3/2} \quad (14)$$

gdzie: γ należy wyrazić w kN/m^3 .

Przykładowe obliczenia

Rozważmy silosy płaskodenne wysokości $h_c = 21,0$ m i średnicy $d_c = 8,60$ m i $d_c = 14,0$ m. Pozostałe dane przyjęte do obliczeń: ciężar objętościowy składowanego materiału (jęczmień) $\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$; iloraz parcia bocznego $K = 0,59 \cdot 1,11 = 0,655$ (porównaj Tabelicę E.1 w normie [1]); współczynniki tarcia o ścianę typu D1, $\mu = 0,24 \cdot 1,16 = 0,278$ oraz typu D3, $\mu = 0,48 \cdot 1,16 = 0,556$. Symbole D1, D2 i D3 oznaczają kategorie szorstkości ściany zgodnie z klasyfikacją podaną w Tabelicy 4.1 normy [1]. Wartości przyjęto zgodnie z zaleceniem p. 4.2.3 normy [1] na podstawie danych z Tabelicy E.1 tej normy. Parametry materiałowe stalowej ściany silosu: $E_w = 210 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0,3$; $\alpha_w = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/deg}$; grubość ścianki stalowej na poziomie dna silosu $t = 6 \text{ mm}$. Ponadto we wzorze (1) przyjęto wartość współczynnika $C_T = 3$ zgodnie z zaleceniem p. 5.6.2. (5) normy [1]. Wartości parcia bocznego i pionowego w fazie napełnienia określono z normowych wzorów (5.1) do (5.6) w przypadku silosu wysokiego i (5.71) do (5.80) w przypadku silosu niskiego. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Podsumowanie i wnioski

Spadek temperatury ściany silosu jest równie prawdopodobny jak wystąpienie huraganowego wiatru czy ponadnormatywnego opadu śniegu. Sytuacja zdecydowanie najmniej korzystniejsza może wystąpić w pełni lata tuż po zakończeniu burzy z gradobiciem. Rozgrzana wcześniej ściana silosu, na skutek wielodniowych upałów i nasłonecznienia, ulegnie gwałtownemu schłodzeniu, a zaproponowany w obliczeniach gradient temperatury jest całkiem realny. Materiał składowany w silosie, ze względu na dużą bezwładność termiczną i niski współczynnik przewodnictwa cieplnego, będzie miał zdecydowanie wyższą temperaturę w całej swej masie (taką, jaką wykazywał przed burzą gradową) niż ściana silosu nagle schłodzona opadem deszczu z gradem.

Tabela 1. Wyniki w przypadku $\mu = 0,278$ i $\Delta T = 20^\circ \text{C}$

Table 1. Results for the case $\mu = 0,278$ and $\Delta T = 20^\circ \text{C}$

Średnica silosu d_c [m]	Efektywny moduł sprężystości ośrodka E_{su} [kPa]	Parcie pionowe na poziomie dna silosu p_{vf} [kPa]	Parcie poziome na poziomie dna silosu p_{hf} [kPa]	Wzrost parcia poziomego wywołany ochłodzeniem ściany p_{ht} [kPa]	Wzrost parcia poziomego [%]
8,6	$12,42 \cdot 10^3$	78,44	51,37	12,05	23,45
14,0	$15,68 \cdot 10^3$	98,96	68,48	14,34	20,94

Tabela 2. Wyniki w przypadku $\mu = 0,556$ i $\Delta T = 20^\circ \text{C}$

Table 2. Results for the case $\mu = 0,556$ and $\Delta T = 20^\circ \text{C}$

Średnica silosu d_c [m]	Efektywny moduł sprężystości ośrodka E_{su} [kPa]	Parcie pionowe na poziomie dna silosu p_{vf} [kPa]	Parcie poziome na poziomie dna silosu p_{hf} [kPa]	Wzrost parcia poziomego wywołany ochłodzeniem ściany p_{ht} [kPa]	Wzrost parcia poziomego [%]
8,6	$7,259 \cdot 10^3$	45,83	30,01	7,21	24,03
14,0	$11,87 \cdot 10^3$	74,95	41,30	11,16	27,02

Wzrost parcia poziomego w efekcie spadku temperatury wykazany w przedstawionych obliczeniach jest znaczny. W przypadku silosu smukłego i wysokiego współczynnika tarcia materiału o ścianę osiąga nawet wartość 27% i może prowadzić do przekroczenia stanu granicznego nośności ściany silosu, a w efekcie do jego awarii. Warto podkreślić konieczność uwzględnienia tego efektu w procesie projektowania, a dzięki względnie prostemu wzorowi (wzór (5.101) z normy [1], określający wzrost parcia poziomego) czynność ta nie powinna sprawić kłopotu nawet początkującemu inżynierowi.

Przytoczony na wstępie przypadek awarii omawiany w pracy [4] Carlsona i Holmesa jest dowodem realności zagrożenia, którego źródłem jest różnica temperatur ściany silosu i materiału składowanego wywołana różnymi przyczynami. Analizowana w pracy sytuacja jest bardzo realna i należy ją uwzględnić w fazie projektowania grubości płaszcza silosu. W praktycznych obliczeniach projektowych jednak, to nie to kryterium decyduje ostatecznie o grubości ściany silosu stalowego. O grubości ściany silosu decydują zazwyczaj kryteria związane ze statecznością ściany silosu wyspecyfikowane w normie [6].

Literatura

- [1] PN-EN 1991-4:2006. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki.
- [2] Łapko A. and Prusiel J. A., Analysis of thermal effects in grouped silos of grain elevators, International Agrophysics, 2006, Vol. 20, pp. 301 – 307.
- [3] Łapko A., Prusiel J. A., Studies on thermal actions and forces in cylindrical storage silo bins, Volume 10, Handbook of Powder Technology, 2001, pp. 189 – 197.
- [4] Carson J. W., Holmes T., Silo failures: Why do they happen? Task Quarterly, Vol. 7, No 4, (2003), pp. 499 – 512.
- [5] Timoshenko S. P., Goodier J. C.; Theory of Elasticity. McGraw-Hill Book Company, New York (1970).
- [6] PN-EN 1993-4-1:2007. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 4 – 1: Silosy.

Przyjęto do druku: 24.07.2015 r.