

dr inż. Jolanta Anna Prusiel¹⁾

Analiza naprężeń termicznych w żelbetowych ścianach silosów na zboże

Analysis of thermal stresses in reinforced concrete walls of the grain silos

DOI: 10.15199/33.2015.09.17

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analizy naprężeń w żelbetowych ścianach cylindrycznych silosów na zboże wywołanych dobowym spadkiem temperatury otoczenia w okresie zimowym. Sformułowano model obliczeniowy silosu wolno stojącego (w ujęciu MES) przy założeniu współpracy konstrukcji ściany i ośrodka ziarnistego. Komorę silosu obciążono symetrycznym parciem ośrodka sypkiego (typu pszenica) i nieliniowym rozkładem spadku temperatury na powierzchni komory i grubości ściany, wyznaczonym metodą różnic skończonych (MRS). Na podstawie analizy numerycznej (MES) naprężeń termicznych w żelbetowej ścianie silosu określono niekorzystne efekty sprzężenia obciążenia statycznego i termicznego w silosach na zboże.

Słowa kluczowe: silos, naprężenia termiczne, żelbetowa ściana.

Abstract. The paper presents the results of reinforced concrete wall analysis of cylindrical grain silos subjected to daily drop of the ambient temperature during the winter period. There is presented computational FEM model of free-standing silo assuming the interaction between the wall construction and stored grain. The silo bins were analyzed under symmetrical pressure (wheat) and nonlinearly distributed temperature on the external surface of the silo and across the thickness of the wall, determined using the Finite Differences Method (FDM). On the basis of numerical stresses analysis for assumed reinforced concrete silo wall the unfavorable effects of interaction of the static and thermal loads in RC grain silos were demonstrated.

Keywords: silos, thermal stresses, reinforced concrete wall.

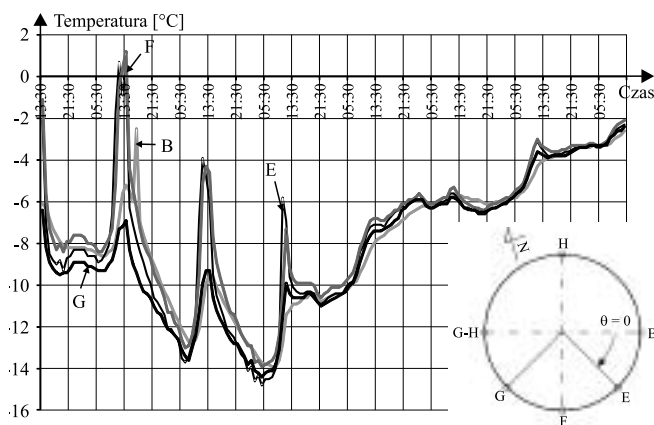
W żelbetowych silosach na zboże, w fazie składowania pod wpływem dobowych spadków temperatury otoczenia, występują dodatkowe naprężenia termiczne w ścianie komory [1, 2]. Powodują one rozciąganie żelbetowej ściany połączone ze zginaniem. Badania przeprowadzone przez zespół badawczy Politechniki Białostockiej na eksploatowanej baterii silosów na zboże w PZZ w Białymstoku wykazały przyrost rozciągających naprężeń termicznych w zbrojeniu wynoszący ok. kilkunastu MPa, w strefie silnej insulacji [2].

Rozciągające naprężenia termiczne w ścianie silosu są wynikiem interakcji ściany powłoki i ośrodka sypkiego. W komorze wypełnionej zbożem, spadek temperatury otoczenia powoduje skrócenie obwodu powłoki, które ograniczone jest podatnością składowanego materiału ziarnistego. W efekcie następuje przyrost parcia termicznego w silosie, który zależy od odkształcalności zboża [3].

Założenia do obliczeń – oddziaływania statyczne i termiczne w silosie na zboże

Analizę naprężeń w żelbetowej ścianie przeprowadzono w cylindrycznym silosie wolno stojącym o wysokości komory $H = 30$ m, średnicy wewnętrznej $d_c = 8$ m i grubości ściany $t = 0,20$ m, wykonanej z betonu klasy C16/20. Komorę silosu obciążono symetrycznym parciem pszenicy wyznaczonym w fazie napełnienia (na podstawie PN-EN 1991-4 [4]). Właściwości fizyko mechaniczne pszenicy przyjęto z tabeli E1, Załącznik E [4]. Oddziaływanie termiczne w analizowanym silosie obliczono na podstawie niestacjonarnych rozkładów temperatury z badań eksperymentalnych [2] przeprowadzonych w okresie zimowym (grudzień 2002 r.) na powierzchni komory elewatora PZZ w Białymstoku (rysunek). Okres największych dobowych spadków temperatury ściany wyniósł 19 h. Odczytane

z tego okresu zmienne pola temperatury posłużyły do wyznaczenia nieliniowych dobowych spadków temperatury na grubości ściany w pkt B, E, F, G (rysunek) za pomocą programu komputerowego TWiND w ujęciu metody różnic skończonych [5, 6].



Rozkład temperatury na betonowej powierzchni komory elewatora PZZ w Białymstoku w okresie zimowym w 2002 r.

Temperature distribution on the external surface of RC silo battery of PZZ Bialystok in winter 2002

Model obliczeniowy silosu wolno stojącego

Do analizy efektów sprzężenia obciążenia statycznego i termicznego w silosie na zboże sformułowano dyskretny model obliczeniowy silosu wolno stojącego (w ujęciu MES) przy założeniu współpracy konstrukcji ściany i ośrodka ziarnistego. Cylindryczną komorę silosu zamodelowano za pomocą elementów bryłowych ośmiowęzłowych o cechach sprężystych. Ścianę grubości 0,20 m utworzono z 5 warstw elementów bryłowych. Przyjęto następującą dyskretyzację siatki powłoki: 150 pasm poziomych wysokości 0,20 m po tworzącej powłoki i 60 pasm pionowych wyznaczono

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; e-mail: j.prusiel@pb.edu.pl

ných przez kąt środkowy $\theta = 6^\circ$ (łącznie 4500 elementów bryłowych). Współpracę między ośrodkiem ziarnistym i ścianą zamodelowano za pomocą więzów sprężystych (jednowymiarowych sprężyn) rozmieszczonych radialnie w węzłach elementów bryłowych. Charakterystykę więzów sprężystych opisano stałą podatności ośrodka ziarnistego $C(z)$, wyznaczoną dla pierścieni powłoki z zależności

$$C(z) = E_{m,h}(z) / [R(1 - \nu_m)] \quad (1)$$

gdzie:

R – promień powłoki [m]; $E_{m,h}$ – moduł sprężystości pszenicy [MPa]; ν_m – współczynnik Poissona pszenicy.

Do wyznaczenia modułu sprężystości pszenicy w kierunku poziomym zastosowano związki empiryczne zaproponowane przez Manbecka i Nelsona [7]. Są to nieliniowe związki funkcyjne między odkształceniami i naprężeniami w ośrodku sypkim sformułowane na podstawie badań doświadczalnych z pszenicą

$$\epsilon_h = 0,01 (-4,92 + 12,20K - 4,71K^2) \cdot (p_{hr}/0,28)^{0,454} \quad (2)$$

$$E_{m,h} = 2,203 \left(\frac{56,1}{-4,92 + 12,20K - 4,71K^2} \right)^{2,203} \cdot \epsilon_h^{1,203} \quad (3)$$

gdzie:

p_{hr} – parcie poziome pszenicy na ścianę silosu po napełnieniu [MPa] (tabela 1); ϵ_h – odkształcenie poziome w ośrodku ziarnistym (tabela 1); $K = 0,60$ – iloraz parcia bocznego pszenicy wg [4].

Obliczone wartości modułu sprężystości pszenicy $E_{m,h}$ w analizowanym silosie przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartość osiowo-symetrycznego parcia poziomego na ścianie silosu oraz odkształcenie poziomych i moduły sprężystości pszenicy
Table 1. The values of axially-symmetrical horizontal pressure on a silo wall and horizontal strains and elastic modulus for stored wheat

Głębokość poniżej zastępczej powierzchni ośrodka z [m]	Parcie poziome po napełnieniu p_{hr} [kPa]	Odształcenie poziome ϵ_h	Moduł sprężystości $E_{m,h}$ [MPa]
13,3	31,53	0,026	26,6
19,1	34,51	0,027	27,9
23,7	35,59	0,028	28,4

Analiza naprężeń termicznych w ścianie silosu

W analizie numerycznej MES model obliczeniowy cylindrycznego silosu wolno stojącego obciążono osiowo-symetrycznym parciem statycznym pszenicy i nieliniowym spadkiem temperatury na obwodzie komory i grubości ściany. Do obliczeń statycznych silosu wykorzystano program ORCAN (MES), opracowany na Politechnice Białostockiej. Na podstawie obliczonych równoleżnikowych naprężeń termicznych w powłoce silosu wyznaczono równoleżnikowe siły rozciągające i momenty zginające (tabela 2). Efekt sprzężenia parcia statycznego i dobowych spadków temperatury określono w postaci przyrostów rozciągających sił równoleżnikowych w ścianie w stosunku do sił od parcia statycznego w silosie (tabela 2).

W tabeli 3 przedstawiono porównanie rozciągających sił równoleżnikowych w ścianie silosu N_θ^T obliczonych MES i analitycznie na podstawie wzoru (4), zalecanego przez krajową normę [8].

$$N_\theta^T = \frac{0,5d_c E_m \alpha_t \Delta T_{sr}}{0,5d_c E_m + (1 - \nu_m) t E_c} \quad (4)$$

gdzie:

ΔT_{sr} – dobowy spadek średniej temperatury na grubości ściany silosu (tabela 3); d_c – średnica komory silosu, $d_c = 8,0$ m; t – grubość ściany komory silosu, $t = 0,20$ m; E_c – moduł sprężystości betonu, $E_c = 27,5$ GPa; $E_{m,h}$ – moduł sprężystości ośrodka sypkiego (tabela 1); ν_m – współczynnik Poissona ośrodka sypkiego, $\nu_m = 0,3$ wg [4].

Tabela 2. Naprężenia termiczne, siły wewnętrzne oraz przyrosty rozciągających sił równoleżnikowej w ścianie silosu wolno stojącego przy nieliniowym spadku temperatury na grubości ściany (MES)
Table 2. The thermal stresses, internal forces and tensile hoop force increments in the free-standing silo wall subjected to nonlinear temperature drop on the thickness of the silo wall (FEM)

Przekrój – kąt θ		0°	45°	90°	135°	180°
$z = 13,3$ m $N_\theta^I = 126,91$ [kN/m]	σ_x^T [kN/m ²]	28,85	32,40	31,71	29,79	30,14
	M_θ^T [kNm/m]	3,64	8,58	9,26	2,19	1,61
	N_θ^T [kN/m]	5,77	6,48	6,34	5,96	6,03
	N_θ^T/N_θ^I [%]	4,6	5,1	5,0	4,7	4,8
$z = 23,7$ m $N_\theta^I = 142,29$ [kN/m]	σ_x^T [kN/m ²]	40,93	42,47	41,32	42,07	30,43
	M_θ^T [kNm/m]	3,58	8,63	9,33	2,13	1,60
	N_θ^T [kN/m]	8,19	8,49	8,26	8,41	6,09
	N_θ^T/N_θ^I [%]	5,8	6,0	5,8	5,9	4,3

W celu porównania wybrano przekrój ściany silosu w pkt F zlokalizowanym w strefie nasłonecznienia (rysunek).

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza MES sprzężonych oddziaływań statycznych i dobowych spadków temperatury otoczenia w okresie zimowym wykazała, że największe dobowe przyrosty rozciągających sił równoleżnikowych w ścianie komory (ok. 6%) wystąpiły w strefie nasłonecznienia (pkt E, F), zaś mniejsze (ok. 4,3%) w strefie cienia (pkt G-H).

Z metody analitycznej, przy liniowym rozkładzie temperatury na grubości komory, uzyskano większe wartości sił równoleżnikowych niż z obliczeń numerycznych. Różnica wynosiła 23% + 50%. Dodatkowe naprężenia termiczne, w połączeniu z występującymi w silosach efektami zmęczeniowymi lub korozją betonu i zbrojenia, wpływają na obniżenie trwałości konstrukcji silosów.

Z metody analitycznej, przy liniowym rozkładzie temperatury na grubości komory, uzyskano większe wartości sił równoleżnikowych niż z obliczeń numerycznych. Różnica wynosiła 23% + 50%. Dodatkowe naprężenia termiczne, w połączeniu z występującymi w silosach efektami zmęczeniowymi lub korozją betonu i zbrojenia, wpływają na obniżenie trwałości konstrukcji silosów.

Literatura

- [1] Bartali El H., Hatfield F. J., Forces in cylindrical grain silos caused by decreasing ambient temperature. ACI Structural Journal, Vol. 87 (1), 1990, 108-116.
- [2] Łapko A., Kołhań J., Gnatowski M., Prusiel J. A., Sokołowski R., Kopacki W., Malesza J., Zastosowanie telemetrii radiowej do monitoringu i badań konstrukcji silosowych. Raport z Proj. Bad. (Nr 8 T07E 002 21), PB, Białystok, 2003, 101 s. (maszynopis).
- [3] Prusiel J. A., Doświadczalne wyznaczanie parametrów opisujących model interakcji ściany silosu i ośrodka sypkiego. Inżynieria i Budownictwo, nr 6, 2011, s. 317-320.
- [4] PN-EN 1991-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Cz. 4: Silosy i zbiorniki.
- [5] Prusiel J. A., Łapko A., Investigation of heat and moisture effects in silos containing agricultural bulk solids. Particle and Particle Systems Characterization, Vol. 24 (4/5), WILEY-VCH, Germany, 2007, 284-290.
- [6] Prusiel J. A., Nikitin W., Analiza stanu wilgotności i naprężeń w ścianach żelbetowych silosów. Przegląd Budowlany, nr 12, 2008, 53-56.
- [7] Manbeck H. B., Nelson G. L., Three dimensional constitutive equations for wheat en masse. Trans. of the ASAE, Vol. 18 (6), 1975, 1122-1127.
- [8] PN-B-03262:2002 Silosy żelbetowe na materiałach sypkich. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja.

Przyjęto do druku: 28.07.2015 r.