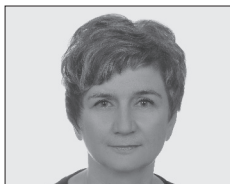


# Efekty oddziaływań gorącego ośrodka sypkiego w żelbetowym silosie prostokątnym



dr hab. inż.  
**JOLANTA ANNA PRUSIEL, PROF. PB**  
Politechnika Białostocka  
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku  
ORCID: 0000-0001-6827-1059



mgr inż.  
**MARTA DOMINIKA KOTOMSKA**  
Politechnika Białostocka (absolwentka)  
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku  
ORCID: 0000-0002-3584-2086

W pracy przedstawiono wpływ sprzężonych oddziaływań statycznych i termicznych na zmianę wartości sił wewnętrznych w żelbetowej ścianie silosu prostokątnego.

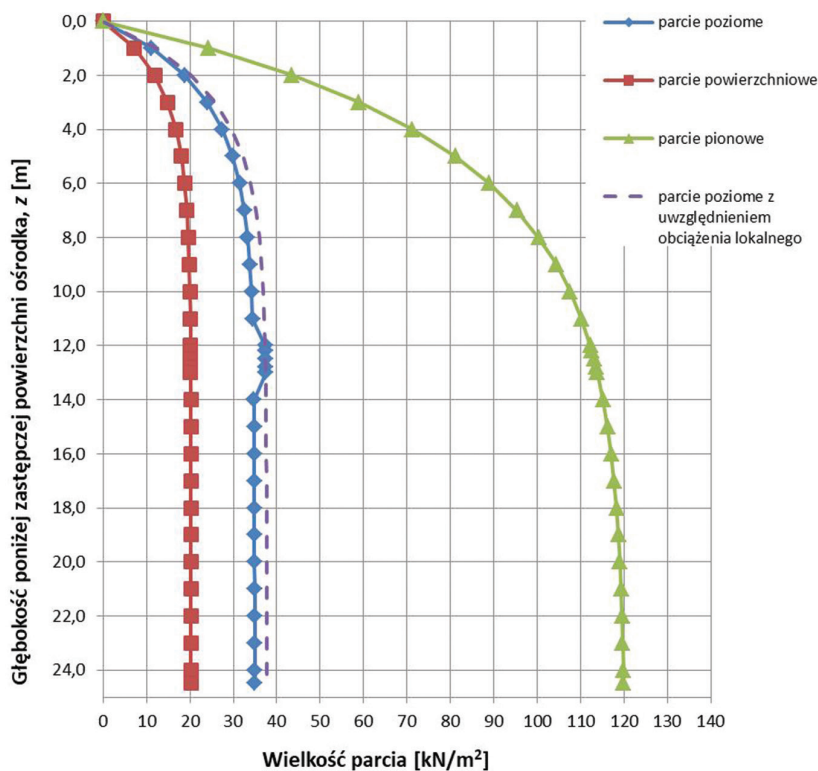
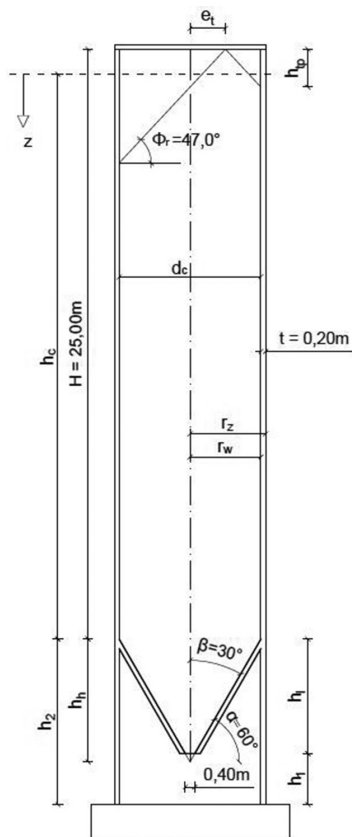
## Wprowadzenie

W eksploatowanych silosach żelbetowych na gorący ośrodek sypki, typu cement czy klinkier cementowy, wyznaczenie efektów oddziaływań termicznych (przemieszczenia, odkształcenia, naprężenia, siły i momenty) jest złożonym zagadnieniem ze względu na niestacjonarny rozkład temperatury ośrodka sypkiego czy powietrza wewnątrz komory silosu. Gorący ośrodek, który przebywa przez pewien czas w silosie, ulega ochłodzeniu,

natomiast bezpośrednio nad nim gromadzi się gorące powietrze. Na przykład cement w momencie wprowadzenia do silosu ma temperaturę około 90–100°C, jednak już w środku komory osiąga temperaturę 75–80°C, a tuż przy powierzchni ściany silosu ma zaledwie 40°C [1].

Badania nad silosami wypełnionymi gorącym klinkierem cementowym opisano w pracy [2], w której analizowano rozkłady temperatury w silosie

w zależności od poziomu jego wypełnienia. Zostały opracowane wykresy rozkładu temperatury w ścianie silosu oraz w znajdującym się wewnątrz klinkierze. Zasypany klinkier cementowy miał temperaturę w przedziale 100–200°C, a gradient temperatury w ścianie wynosił 20°C. W pracy [3] wykazano wpływ efektów termicznych na przyrost sił równoleżnikowych i momentów zginających w żelbetowym silosie cylindrycznym na gorący klinkier cementowy.



Rys. 1. Geometria komory silosu na klinkier cementowy

Rys. 2. Wykresy składowych parcia klinkieru cementowego w silosie o wymiarach 3 x 3 m

Tab. 1. Przyjęte do obliczeń dane geometryczne silosów

Charakterystyka geometryczna komory silosu	Wymiary komory		
	3,00 x 3,00 m	4,00 x 4,00 m	6,00 x 6,00 m
wysokość ściany	$H = 25,00$ m	$H = 25,00$ m	$H = 25,00$ m
grubość ściany	$t = 0,20$ m	$t = 0,20$ m	$t = 0,20$ m
długość ściany wewnętrzna	$a = 3,00$ m	$a = 4,00$ m	$a = 6,00$ m
miarodajny wymiar przekroju poprzecznego silosu	$d_c = 3,00$ m	$d_c = 4,00$ m	$d_c = 6,00$ m
wysokość stożka	$h_h = 2,60$ m	$h_h = 3,45$ m	$h_h = 5,20$ m
wysokość leja	$h_l = 2,25$ m	$h_l = 3,10$ m	$h_l = 4,85$ m
wysokość górnego stożka nasypowego	$h_{ip} = 0,80$ m	$h_{ip} = 1,07$ m	$h_{ip} = 1,61$ m
wysokość pionowego segmentu ściany	$h_c = 24,47$ m	$h_c = 24,29$ m	$h_c = 23,93$ m
kąt nachylenia ścian leja	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 60^\circ$
kąt połówkowy wierzchołka leja	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 30^\circ$
mimośród otworu nasypowego	$e_t = 0,75$ m	$e_t = 1,00$ m	$e_t = 1,50$ m
pole przekroju poprzecznego	$A = 9,00$ m <sup>2</sup>	$A = 16,00$ m <sup>2</sup>	$A = 36,00$ m <sup>2</sup>
obwód wewnętrzny pola przekroju poprzecznego silosu	$U = 12,00$ m	$U = 16,00$ m	$U = 24,00$ m
objętość składowania	$V = 342,02$ ton	$V = 610,53$ ton	$V = 1385,79$ ton
smukłość silosu	$h_c/d_c = 8,16 > 2$	$h_c/d_c = 6,07 > 2$	$h_c/d_c = 3,99 > 2$
klasa oceny oddziaływań	AAC 2	AAC 2	AAC 2

Poniżej wyznaczono rozkłady pól temperatury w ścianie silosu prostopadłościennego wypełnionego gorącym klinkierem cementowym i przeanalizowano wpływ sprzężenia parcia statycznego ośrodka sypkiego oraz obciążenia termicznego na zmiany rozkładów sił wewnętrznych w żelbetowej ścianie silosu.

### Wyznaczenie parcia w silosie

W analizach założono, że rozpatrywane silosy żelbetowe na gorący klinkier cementowy będą miały wysokość komory 25 m o przekroju poprzecznym kwadratowym i trzech wymiarach boku: 3 m, 4 m oraz 6 m. Ścianę silosu przyjęto o grubości 20 cm, klasyfikowaną jako szorstka (kategoria D3, tab. 4.1 [4]). Według zaleceń [1] kąt nachylenia ścian leja ostrosłupowego powinien być przynajmniej o 10° większy od kąta stoku

naturalnego  $\phi_f$  składowanego materiału. Dla klinkieru cementowego kąt  $\phi_f = 47^\circ$  (zał. E, tab. E.1 [4]), na tej podstawie przyjęto kąt nachylenia ścian leja równy  $\alpha = 60^\circ$  (rys. 1). W tab. 1. zamieszczono charakterystykę silosów przyjętych do obliczeń (oznaczenia wymiarów silosu pokazano na rys. 1.).

W analizowanych silosach składowe parcia od ośrodka sypkiego w fazie po napełnieniu silosu wyznaczono na podstawie teorii Jansena zgodnie z PN-EN 1991-4 [4] i literaturą [1, 5] jak dla silosu smukłego. W silosach założono napełnianie na małym mimośrodku ( $e_t = 0,25 d_c$ , tab. 1.). Wszystkie rozpatrywane silosy na podstawie kryteriów zawartych w tablicy 2.1 [4] zostały zakwalifikowane do klasy oceny oddziaływań 2 (klasa AAC2). W tab. 2. obliczono górne i dolne wartości parametrów materiałowych klinkieru cemen-

towego, których użyto do wyznaczenia składowych parcia symetrycznego oraz lokalnego. Parcie lokalne określono proporcjonalnie do wysokości komory silosu (p. 5.2.3(1) [4], silos w klasie AAC2). Do wyznaczenia parcia w silosie wg [4] przyjęto górną wartość ciężaru jednostkowego ośrodka i całkowite napełnienie silosu. Na rys. 2. przedstawiono wykresy składowych parcia w komorze silosu o wymiarach boku 3 m (faza po napełnieniu).

### Oddziaływanie termiczne w ścianie silosu

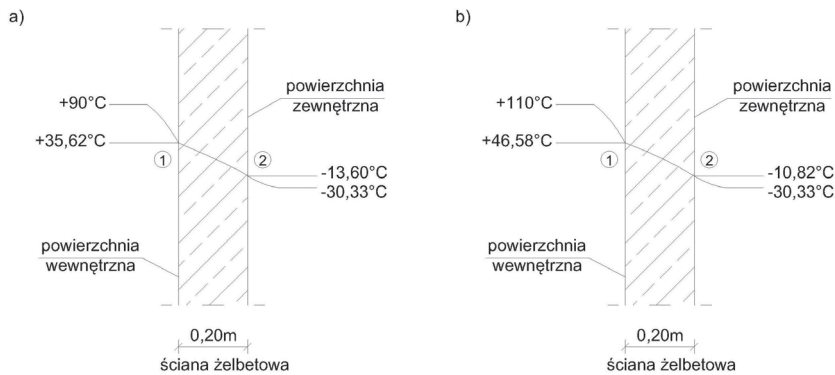
Rozkłady pól temperatury w żelbetowej ścianie silosu zlokalizowanego w Otwocku, spowodowane składowaniem gorącego klinkieru cementowego, wyznaczono zgodnie z Eurokodem 1 – Oddziaływania na konstrukcje [6], przy założeniach:

Tab. 2. Właściwości klinkieru cementowego przyjęte do wyznaczenia parcia w silosie

Właściwości klinkieru cementowego	współczynnik konwersji $a$	wartość dolna	wartość średnia	wartość górna
kąt tarcia wewnętrznego $\phi_f$ [°]	1,20	33,33	40	48
iloraz parcia bocznego $K$	1,31	0,29	0,38	0,50
współczynnik tarcia o ścianę $\mu$	1,07	0,58	0,62	0,66
ciężar jednostkowy $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]		15,0		18,0
bazowy współczynnik parcia lokalnego $C_{op}$		0,7		

Tab. 3. Zestawienie składowych temperatury w ścianie silosu

Temperatura klinkieru cementowego	$T(1)$ [°C]	$T(2)$ [°C]	Średnia temperatura ściany $T$ [°C]	Temperatura początkowa $T_0$ [°C]	Składowa równomierna temperatury $\Delta T_U$ [°C]	Składowa różnicy temperatur na pow. ściany $\Delta T_M$ [°C]
Warunki zimowe						
$T_{in,1} = 90^\circ\text{C}$	35,62	-13,60	11,01	8,00	3,01	49,22
$T_{in,2} = 110^\circ\text{C}$	46,58	-10,82	17,88	8,00	9,88	57,40
Warunki letnie						
$T_{in,1} = 90^\circ\text{C}$	66,27	44,80	55,54	8,00	47,54	21,47
$T_{in,2} = 110^\circ\text{C}$	77,23	47,58	62,40	8,00	54,40	29,65



Rys. 3. Rozkład temperatury w ścianie silosu w warunków zimowych: a) klinkier  $T_{in,1} = 90^\circ\text{C}$ , b) klinkier  $T_{in,2} = 110^\circ\text{C}$

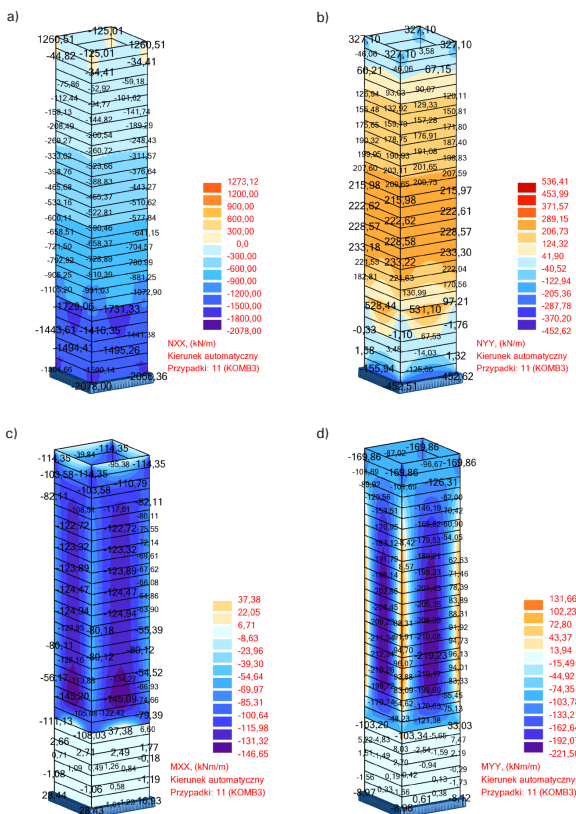
– temp. klinkieru  $T_{in,1} = 90^\circ\text{C}$ ,  $T_{in,2} = 110^\circ\text{C}$  [2],  
 – temp. otoczenia latem  $T_{out,max} = 37,50^\circ\text{C}$  [6],  
 – temp. otoczenia zimą  $T_{out,min} = -30,33^\circ\text{C}$  [6],  
 – gr. ściany  $t = 0,20\text{ m}$ ,  
 – współczynnik przewodzenia ciepła (żelbet)  $\lambda = 1,70\text{ W/(mK)}$  [1].

Wyznaczone temperatury na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej ściany przy liniowym rozkładzie temperatury na grubości ściany pokazano na rys. 3., a składowe temperatury uwzględnione w testach obliczeniowych zestawiono w tab. 3. W obliczeniach nie uwzględniono warstwy przyściennej ośrodka sypkiego tłumiącej strumień ciepła.

### Warianty testów i analiza wyników

Sily wewnętrzne od sprzężonych oddziaływań statycznych i termicznych w prostopadłościennym silosie wyznaczono metodą elementów skończonych, stosując model obliczeniowy 3D. Silos o trzech wymiarach przekroju poprzecznego (tab. 1.) na gorący klinkier cementowy poddano następującym wariantom obciążenia: (1) – obciążenie statyczne od parcia ośrodka sypkiego, (1)+(2) – obciążenie statyczne od parcia ośrodka sypkiego (1) w połączeniu z polem temperatury (2). Łącznie wykonano 9 testów obliczeniowych. Efekty sprzężonych oddziaływań statycznych i termicznych w analizowanych silosach w warunkach zimowych oraz letnich omówiono szeroko w pracy [7], natomiast dalej przedstawiono wybrane z nich. Na rys. 4. pokazano wyniki obliczeń statycznych silosu o wymiarach przekroju poprzecznego 6 x 6 m.

Przeanalizowano efekty oddziaływania gorącego ośrodka sypkiego w silosach o trzech różnych wymiarach przekroju poprzecznego, w postaci porównania momentów zginających w przęśle i w narożu ściany (tab. 4., rys. 6.) oraz sił podłużnych poziomych (rys. 5.). W tab. 4. obliczono w przekroju komory w odległości 18,5 m od górnej jej krawędzi (poziom 0,74H) przyrosty momentów zginających pod wpływem obciążenia termicznego.



Rys. 4. Mapy sił wewnętrznych w silosie o wymiarach 6 x 6 m na klinkier cementowy o temp.  $T=90^\circ\text{C}$  (wariant (1)+(2), zima): a) siły podłużne pionowe, b) siły podłużne poziome, c) momenty zginające pionowe, d) momenty zginające poziome



Tab. 4. Przyrosty momentów zginających w przekroju poziomym ściany silosu

Poziom	Wymiary komory silosu [m]	Temperatura klinkieru	Przekrój ściany	Momenty zginające poziome $M_R$ [kNm/m]				
				(1)	(1)+(2) zima	Przyrost [%]	(1)+(2) lato	Przyrost [%]
0,74 H (18,5m od góry komory)	3,0 x 3,0	90°C	przęsło	-16,33	-117,83	621,6	-60,62	271,2
			naroże	32,00	-69,49	317,2	-12,28	138,4
	4,0 x 4,0	90°C	przęsło	-37,46	-138,97	271,0	-81,70	118,1
			naroże	73,15	-26,34	136,0	28,99	60,4
	6,0 x 6,0	90°C	przęsło	-117,81	-219,36	86,2	-162,09	37,6
			naroże	231,82	130,35	43,8	187,74	19,0

Na podstawie wyników wielowariantowej analizy opracowano nomogram i zaproponowano zależność do wyznaczenia zwiększonych momentów zginających poziomych  $M_R^*$  w ścianie silosu jako efekt oddziaływania gorącego klinkieru cementowego:

$$M_R^* = (1 + \alpha) \cdot M_R \quad (1)$$

gdzie:  $M_R^*$  – poziomy moment zginający w ścianie uwzględniający efekty oddziaływań termicznych,  $M_R$  – poziomy moment zginający od parcia statycznego wg Janssena [4],  $\alpha$  – współczynnik wpływu oddziaływań termicznych (rys. 7).

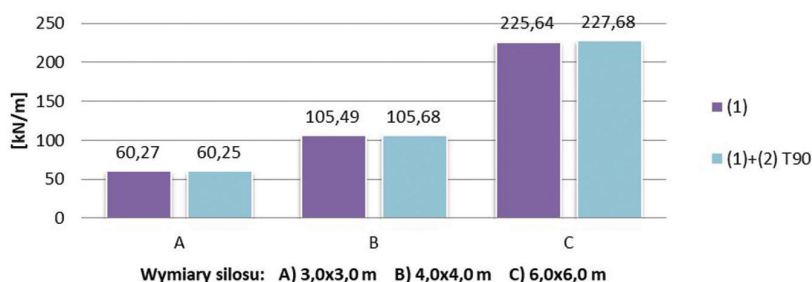
Nomogram pokazany na rys. 7. może być zastosowany do wyznaczania przyrostów poziomych momentów zginających  $M_R$  w przęśle ściany w przekroju 0,74 H od oddziaływań termicznych w stosunku do momentów wyznaczonych od parcia ośrodka sypanego według Janssena, w silosach prostokątnych o wysokości komory 25 m, wymiarach boku 3 m, 4 m i 6 m oraz grubości ściany 0,20 m, wypełnionych klinkierem cementowym o temp. 90°C i 110°C.

### Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona wielowariantowa analiza numeryczna silosów prostopadłościennych potwierdziła wpływ sprężenia parcia ośrodka sypanego i oddziaływań termicznych (od gorącego klinkieru cementowego oraz temperatury otoczenia) na redystrybucję sił wewnętrznych w żelbetowych ścianach silosu. Przyrosty sił wewnętrznych pochodzące od oddziaływania gorącego klinkieru cementowego są bardziej znaczące w komorach o mniejszych wymiarach. Efekty te nasilają się w górnych częściach komór, gdzie parcie materiału sypanego jest małe, a oddziaływanie temperatury dominujące.

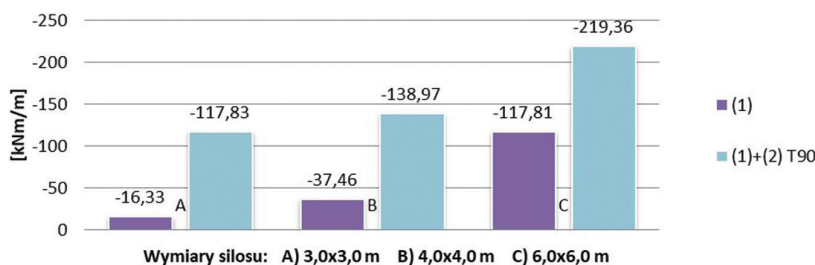
Z analizy wynika, że temperatura zasypywania gorącego ośrodka sypanego istotnie wpływa na rozkład temperatury w ścianie oraz na wartości sił wewnętrznych w silosach. Zimą w silosach 3 x 3 m występują nawet 7-krotne przyrosty poziomych momentów zginających, latem 3,5-krotne przy temp. klinkieru 110°C. W przypadku silosów o komo-

Porównanie wartości sił podłużnych poziomych  $R$  w przekroju 0,74H

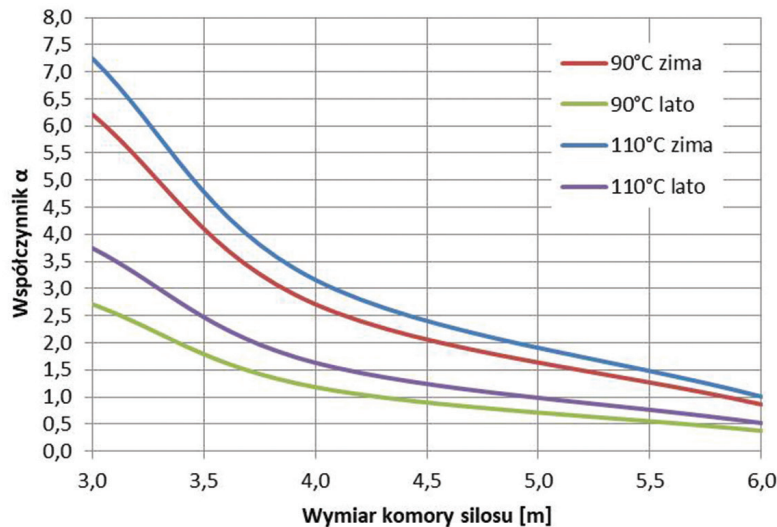


Rys. 5. Porównanie sił podłużnych poziomych  $R$  w ścianie (temp. klinkieru  $T = 90^\circ\text{C}$ , zima)

Porównanie wartości momentów poziomych  $M_R$  w przęśle w przekroju 0,74H



Rys. 6. Porównanie momentów zginających poziomych  $M_R$  w przęśle ściany (temp. klinkieru  $T = 90^\circ\text{C}$ , zima)



Rys. 7. Nomogram do odczytu współczynnika wpływu oddziaływań termicznych w silosie

Z analizy wynika, że temperatura zasypywania gorącego ośrodka sypkiego istotnie wpływa na rozkład temperatury w ścianie oraz na wartości sił wewnętrznych w silosach.

W ramach 4 x 4 m i 6 x 6 m zmiany momentów poziomych w przęśle i narożu dla tych samych warunków są znacznie mniejsze, lecz nadal znaczące. Zauważono, że oddziaływania termiczne od gorącego ośrodka sypkiego mają zdecydowanie mniejszy wpływ na przyrost poziomej siły podłużnej w ścianie silosu (zwłaszcza zimą). Największe przyrosty poziomej siły podłużnej wystąpiły w warunkach letnich w silosach o wymiarach boku 6 x 6 m, lecz nie przekroczyły 50%.

Zaproponowany nomogram może posłużyć w projektowaniu do oszacowania przyrostu momentów zginających poziomych w żelbetowej ścianie silosu prostokątnego wypełnionego gorącym klinkierem cementowym.

#### Literatura

- [1] Kobiak J., Stachurski W., Konstrukcje żelbetowe – tom 4, Arkady, Warszawa 1991.
- [2] Hampe E., Silos. Band 1 Grundlagen. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1987.
- [3] Prusiel J.A., Tomczuk K., 2012, Efekty sprzężenia parcia statycznego i pól temperatury w żelbetowych silosach na gorący ośrodek sypki, „Przegląd Budowlany”, nr 4, s. 53–57.
- [4] PN-EN 1991-4, 2008, Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki.
- [5] Halicka A., Franczak D., Projektowanie zbiorników żelbetowych, T. 1. Zbiorniki na materiały sypkie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011.
- [6] PN-EN 1991-1-5, 2005, Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-5: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania termiczne.
- [7] Kotomska M.D., Wielowariantowa analiza oddziaływań statycznych i termicznych w żelbetowych silosach prostokątnych, Praca dyplomowa, Promotor: J.A. Prusiel, WBilŚ, Politechnika Białostocka, Białystok 2020.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.7975

#### PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Prusiel Jolanta Anna, Kotomska Marta Dominika, 2022, Efekty oddziaływań gorącego ośrodka sypkiego w żelbetowym silosie prostokątnym, „Builder” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.7975

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wpływ sprzężonych oddziaływań statycznych i termicznych na zmianę wartości sił wewnętrznych w żelbetowej ścianie silosu prostokątnego. Metodą elementów skończonych przeprowadzono obliczenia silosu o wysokości komory  $H = 25$  m i grubości ściany  $t = 0,20$  m oraz trzech wymiarach przekroju poprzecznego: 3 x 3 m, 4 x 4 m i 6 x 6 m. Silosy analizowano w fazie pracy statycznej po napełnieniu gorącym klinkierem cementowym o temperaturach:

$T_1 = 90^\circ\text{C}$  i  $T_2 = 110^\circ\text{C}$ . Analiza numeryczna silosów prostokątnych potwierdziła wpływ oddziaływań termicznych od gorącego klinkieru na przyrost sił wewnętrznych w żelbetowej ścianie silosu. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano nomogram do określenia przyrostu poziomych momentów zginających w ścianie silosu prostokątnego od obciążenia termicznego.

**Słowa kluczowe:** silos żelbetowy, gorący ośrodek sypki, oddziaływania termiczne

**Abstract:** THE IMPACT EFFECTS OF A HOT BULK SOLID IN RECTANGULAR REINFORCED CONCRETE SILO. The paper presents the effect of coupled static and thermal actions on the change of internal forces in the reinforced concrete wall of a rectangular silo. The finite element method was used to calculate a silo with a chamber height  $H = 25$  m and wall thickness  $t = 0.20$  m and three cross-sectional dimensions: 3 x 3 m, 4 x 4 m and 6 x 6 m. The silos were analysed in the static operation phase after filling with hot cement clinker with temperatures:  $T_1 = 90^\circ\text{C}$  and  $T_2 = 110^\circ\text{C}$ . Numerical analysis of rectangular silos confirmed the influence of thermal actions from hot clinker on the increase of internal forces in the reinforced concrete silo wall. Based on the obtained results, a nomogram was developed to determine the increase on horizontal bending moments in the wall of a rectangular silo from the temperature action.

**Keywords:** RC silo, hot bulk solid, thermal actions

REKLAMA



## PRZEDSIĘBIORSTWO ROBÓT INSTALACYJNYCH

59-900 Zgorzelec, ul. Podwale 12a  
tel.: (75) 775-26-56 fax (75) 775-29-23  
biuro@insbudzgorzelec.pl, www.insbudzgorzelec.pl

- projektowanie i wykonawstwo instalacji i sieci wod.-kan., c.o.,
- roboty ogólnobudowlane,
- budownictwo mieszkaniowe,
- budownictwo przemysłowe,
- hale,
- budowa stacji paliw,
- konstrukcje betonowe,
- konstrukcje żelbetowe,
- budowle hydrotechniczne,
- roboty melioracyjne i drogowe,
- przeciski pod drogą,
- wynajem sprzętu budowlanego,
- szalunki systemowe,
- maszyny.

