

Obliczeniowa kontrola zarysowania ścian żelbetowych silosów na podstawie eurokodów

Prof. dr hab. inż. Andrzej Łapko, dr inż. Jolanta Anna Prusiel,
Politechnika Białostocka

1. Wprowadzenie

Obserwacje stanu technicznego żelbetowych komór silosów cylindrycznych (także w układach zblokowanych) wskazują, że ściany takich silosów podlegają często intensywnym zarysowaniom (fot.1). W obiektach po wieloletnim okresie eksploatacji obserwuje się pionowe rysy nadmiernej szerokości i wysokości nawet kilkunastu metrów [1], [2]. W przypadku przechowywania materiałów sypkich podatnych na zawilgocenie, stan taki uniemożliwia praktycznie eksploatację silosu.

Problem kontroli zarysowania ścian żelbetowych silosów w ujęciu norm europejskich wymaga odrębnego postępowania, gdyż z reguły nie jest możliwe zastosowanie procedur uproszczonych. Niezbędna jest wnikliwa analiza statyczna ustroju uwzględniająca, w ujęciu Eurokodu 1–4 [3], złożone układy obciążeń, ustalenie wymagań co do szczelności żelbetowej ściany wg Eurokodu 2–3 [4] oraz przeprowadzenie obliczeniowej kontroli szerokości rys zgodnie z Eurokodem 2, część 1 [5].

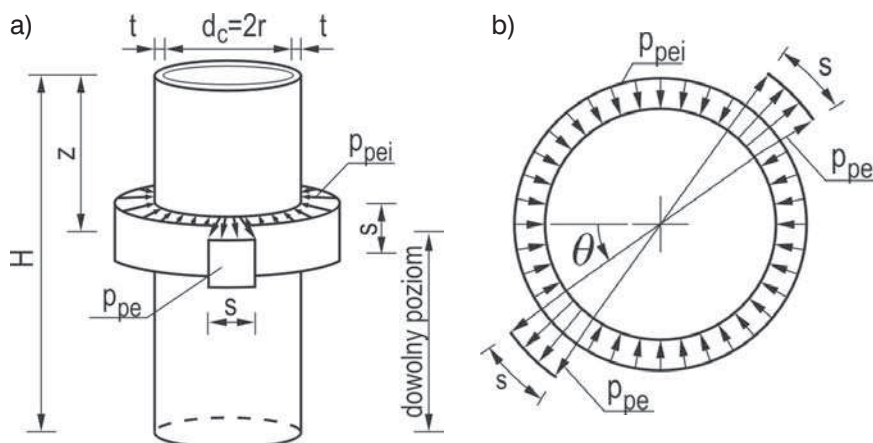
W artykule przedstawiono analizę problemu wyznaczenia szerokości rys pionowych w żelbetowych ścianach cylindrycznych silosów.

2. Rozkłady obciążeń i sił przekrojowych w płaszczynie poziomej ściany silosu

W odróżnieniu do cylindrycznych ścian zbiorników na ciecz, które mogą być w znacznym zakresie traktowane jako osiowo rozciągane, w smukłych ścianach żelbetowych silosów (nawet przy braku oddziaływań temperatury) należy uwzględniać stany rozciągania mimośrodowego. Mogą być one wywołane losowo zmiennym rozkładem parcia silosowego na obwodzie silosu napełnionego lub opróżnianego w różnych warunkach eksploatacyjnych.

W silosach grubościennych, do jakich zalicza się komory żelbetowe, o stanie zgięciowym w płaszczynie poziomej ściany decydują dwa podstawowe schematy rozkładów obciążeń mechanicznych, które muszą być rozpatrzone oddzielnie (nie podlegają superpozycji):

- Stan mimośrodowego rozciągania wywołany składową osiowo symetryczną parcia silosowego i parcia lokalnego, rozłożoną miejscowo na obwodzie ściany (rys. 1), uzupełnioną o równomiernie rozłożoną składową p_{pei} (o zwrocie przeciwnym);
- Stan mimośrodowego rozciągania ściany wywołany niecentrycznym opróżnianiem silosu, przy zało-



Rys. 1. Schemat rozkładu parcia lokalnego w przekroju żelbetowego silosu grubościennego wywołującego stany mimośrodowego rozciągania: a) losowe umiejscowienie parcia lokalnego, b) lokalne obciążenie rozłożone na obwodzie silosu

zeniu, że oś otworu wysypowego jest zlokalizowana na mimośrodku $e > 0,25d_c$, gdzie d_c oznacza wymiar rzutu przekroju poprzecznego silosu (stan nie rozpatrywany w niniejszym artykule).

Parcie lokalne, które jest obciążeniem dowolnie umiejscowionym przy opróżnianiu silosów zaliczanych do klas AAC2 i AAC3 (klasy oceny oddziaływań przedstawione poniżej w tabeli 1) zgodnie z PN-EN1991-4 [3] należy określać ze wzoru

$$p_{pe} = C_{pe} p_{he}, \quad p_{pei} = p_{pe} / 7 \quad (1)$$

w którym dla $h_c / h_d > 1,2$ współczynnik C_{pe} oblicza się z wyrażenia

$$C_{pe} = 0,42 C_{op} [1 + 2E^2] (1 - \exp\{-1,5[(h_c / d_c) - 1]\}) \quad (2)$$

$$E = 2e / d_c, \quad e = \max(e_f, e_0) \quad (3)$$

gdzie:

e_f – maksymalny mimośrodek górnego stożka nasypowego podczas napełniania,

e_0 – mimośrodek liczony do środka otworu wysypowego,

p_{he} – parcie przy opróżnianiu na wysokości, na której przyłożono obciążenie lokalne,

C_{op} – bazowy współczynnik parcia lokalnego dla ośrodka (Tablica E.1 [3]).

Wysokość strefy, na której przyłożone jest obciążenie lokalne (rys. 1a) przyjmuje się równą

$$s = \pi d_c / 16 \cong 0,2d_c \quad (4)$$

W małych silosach należących do klasy oceny oddziaływań AAC1, lokalne obciążenia przy opróżnianiu mogą być pominięte.

Tabela 1. Zalecana klasyfikacja oceny oddziaływań na silosy wg PN-EN 1991-4 [3]

Klasa oceny oddziaływań	Opis
Klasa oceny oddziaływań 3 (AAC 3)	Silosy o objętości składowania ponad 10 000 ton Silosy o objętości składowania ponad 1 000 ton, w których występuje którakolwiek z następujących sytuacji obliczeniowych: a) niecentryczne opróżnianie przy $e_f/d_c > 0,25$, b) niskie silosy, przy mimośrodku górnego stożka nasypu $e_f/d_c > 0,25$.
Klasa oceny oddziaływań 2 (AAC 2)	Wszystkie silosy omówione w niniejszej normie i nie umieszczone w innej klasie.
Klasa oceny oddziaływań 1 (AAC 1)	Silosy o objętości składowania poniżej 100 ton.

Zależności opisujące obciążenie lokalne w silosach na podstawie Eurokodu 1, część 4 [3] bazują na założeniach przyjętych w normie niemieckiej DIN 1055 [6]. Wartość obciążenia lokalnego przyłożo-

nego na powierzchni $s \cong 0,2d_c \cong 0,4r$ wyznacza się ze wzoru

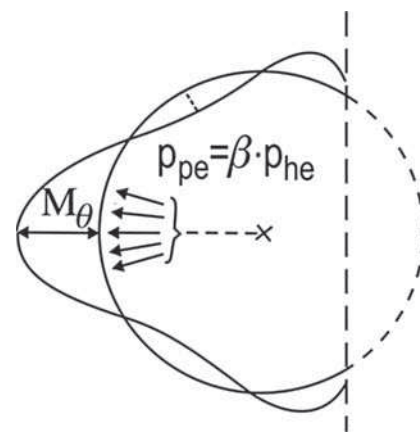
$$p_{pe} = \beta \cdot p_{he} \quad (5)$$

w którym

$$\beta = \beta_h \cdot \beta_a \cdot \beta_r \cdot \beta_G \quad (6)$$

gdzie β jest współczynnikiem nierównomierności obliczanym jako iloczyn czterech parametrów, które zależą od: β_h – smukłości komory silosu (h/d_c), β_a – mimośrodkowego opróżniania (e_0/r), β_r – sztywności ściany silosu (r/t), β_G – rodzaju materiału sypkiego składowanego w silosie [1].

Rozkłady momentów zginających w przekroju poziomym cylindrycznej ściany wywołane układem obciążeń lokalnych pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkład momentu zginającego na obwodzie walcowej ściany silosu

Sposób obliczania takiego momentu opisano w kilku pracach, np. [1], [7]. W przypadku komór walcowych, można w przybliżeniu założyć, że największe momenty zginające równoleżnikowe i południkowe powstaną, gdy obciążenie lokalne będzie przyłożone w połowie wysokości ściany silosu [1], [8]. Wartości tych momentów zależą od wymiaru $s \cong 0,2d_c$ kwadratowej powierzchni lokalnego parcia, ilorazu H/r oraz ilorazu r/t . Do obliczenia maksymalnych momentów zginających równoleżnikowych i południkowych w ścianie od parcia lokalnego można wykorzystać nomogramy zamieszczone w pracy [1]. W przypadku wystąpienia w ścianie gradientu temperatury, należy dodatkowo uwzględnić momenty zginające o charakterze termicznym.

3. Klasyfikacja szczelności zbiorników żelbetowych wg PN-EN 1992-3 dla przypadku mimośrodkowego rozciągania ściany

W PN-EN 1992-3 [4] wyróżniono 4 klasy szczelności zbiorników i silosów. Silosy służące do składowania suchych materiałów sypkich mogą być projektowane na klasę szczelności 0, jednak mogą być one także

przypisane do klas 1, 2 lub 3, kiedy składowany materiał sycki jest szczególnie podatny na zawilgocenie. Podane w normie [5] obliczeniowe wymagania w zakresie kontroli zarysowania w poszczególnych klasach przedstawiono poniżej.

• Klasa szczelności 0

Można w tym przypadku przyjąć wymagania zawarte w normie PN-EN 1992-1-1 [5], tzn. stosować uproszczony sposób kontroli szerokości rys lub określać obliczeniowo szerokość rys w tych przypadkach, gdy kontrola uproszczona nie jest możliwa. Należy wówczas sprawdzać obliczeniowo warunek

$$w_k \leq w_{\max} \quad (7)$$

przy czym wartość w_{\max} przyjmuje się jak dla zwykłych konstrukcji, wg [5]. Należy jednak zauważyć, że podany w normie [5] sposób uproszczony sprawdzenia zarysowania ograniczono do przypadków zginania (bez znaczącego udziału siły rozciągającej) lub do przypadku równomiernego rozciągania. W przypadku ścian silosów walcowych, żaden z wymienionych przypadków nie występuje w praktyce, gdyż siły rozciągającej towarzyszą momenty zginające o znaczącej wartości, co opisano w punkcie 2.

• Klasa szczelności 1

Szerokość dowolnej rysy, która może wystąpić na całej wysokości przekroju musi być ograniczona do wartości w_{k1}

$$w_k \leq w_{k1} \quad (8)$$

W normie [4] nie podano jednak wymagań w zakresie wartości w_{k1} dla ścian silosów, natomiast zalecane wartości dla konstrukcji zbiorników na wodę zdefiniowano w funkcji ilorazu parcia hydrostatycznego h_D [m] na ścianę zbiornika i grubości h ściany. Dla $h_D/h \leq 5$, $w_{k1} = 0,2$ mm, podczas gdy dla $h_D/h \geq 35$, $w_{k1} = 0,05$ mm. Dla wartości pośrednich h_D/h można stosować liniową interpolację pomiędzy wartościami 0,2 i 0,05 mm. Ograniczenie szerokości rys do powyższych wartości powinno prowadzić do efektywnego samuszczelnienia rys we względnie krótkim czasie.

• Klasa szczelności 2

Należy w zasadzie eliminować możliwość powstania rys przecinających całą grubość ściany, chyba że zostaną zastosowane specjalne rozwiązania (np. okładziny uszczelniające).

• Klasa szczelności 3

W zasadzie wymaga się zastosowania specjalnych rozwiązań (np. okładzin lub sprężenia) celem zapewnienia szczelności przeciwdziałającej przeciekowi wody.

W klasach 2 i 3 należy obliczeniowo zapewnić, aby rysy nie przecinały całej grubości ściany. Można to osiągnąć w przekrojach ścian silosów ze strefą

ściskaną (przy rozciąganiu z dużym mimośrodem), zapewniając obliczeniowo ograniczenie

$$x \geq x_{\min} \quad (9)$$

Grubość x_{\min} warstwy betonu ściskanego w ścianie, obliczona przy wystąpieniu wszystkich możliwych kombinacji oddziaływań, powinna być przynajmniej równa $0,2h$, lecz nie mniej niż 50 mm. Gdy ściana poddana jest oddziaływaniom o zmiennych znakach, można rozważyć wystąpienie rysy przelotowej, o ile ta sama część przekroju będzie zawsze poddana ścisaniu [2].

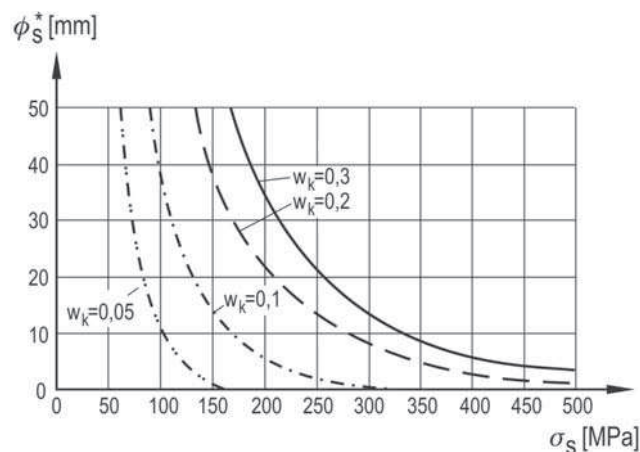
4. Obliczeniowa kontrola rys pionowych w walcowej ścianie silosu

4.1. Uproszczona kontrola zarysowania

Zgodnie z normą [4], w ścianach betonowych zbiorników na ciecze i silosów zaliczonych do klasy szczelności 0 i 1 można zastosować kontrolę uproszczoną, polegającą na ograniczeniu maksymalnej średnicy zbrojenia ściany ϕ_s lub maksymalnego rozstawu s_{\max} prętów tego zbrojenia

$$\phi \leq \phi_s \text{ lub } s \leq s_{\max} \quad (10)$$

Sprawdzenie uproszczone ograniczono jednak wyłącznie do przekrojów całkowicie równomiernie rozciąganych (przypadku osiowego rozciągania, który w walcowych silosach praktycznie nie występuje). Zgodnie z normą [4], maksymalną średnicę pręta lub maksymalny rozstaw określa się z nomogramów, w funkcji naprężenia σ_s w zbrojeniu przeciętym rysą. Sposób obliczenia tego naprężenia dla przypadku rozciągania z małym mimośrodem podano w punkcie 4.2. Obliczenia przebiegają dwuetapowo: na etapie 1, z odpowiedniego nomogramu (rys. 3), dla założonej szerokości rysy (od 0,05 do 0,3 mm), wyznacza się maksymalną średnicę pręta ϕ_s^* . Następnie przeprowadza się korektę tej średnicy, wyznaczając wartość ϕ_s . Podobna dwuetapowa pro-



Rys. 3. Nomogram do wyznaczenia maksymalnej średnicy zbrojenia, wg [4]

cedura występuje w PN-EN 1992-1-1 [5], jednak w PN-EN 1992-3 [4] średnicę maksymalną ϕ_s zbrojenia wyznacza się z innego wzoru

$$\phi_s = \phi_s^* \left(\frac{f_{ct,eff}}{2,9} \right) \frac{h}{10(h-d)} \quad (11)$$

gdzie: $f_{ct,eff}$ – średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie, w chwili zarysowania.

4.2. Obliczanie szerokości rys pionowych w ścianach silosów

Zgodnie z wymaganiami PN-EN 1992-1-1 [5] szerokość rysy w zbrojonym elemencie rozciągającym mimośrodowo należy obliczyć ze wzoru (12), w zależności od ε_{sm} – średniego odkształcenia zbrojenia, z uwzględnieniem efektu „tension stiffening” i ε_{cm} – średniego odkształcenia betonu rozciąganego (na odcinku między rysami).

$$w_k = (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) s_{r,max} \quad (12)$$

Różnicę odkształceń w zbrojeniu rozciągającym i betonie oblicza się z zależności

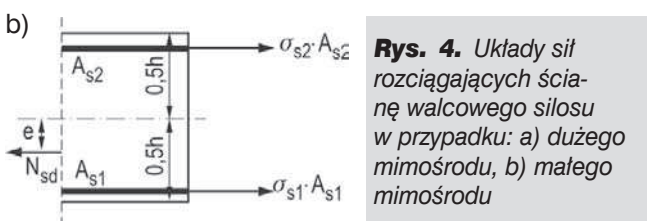
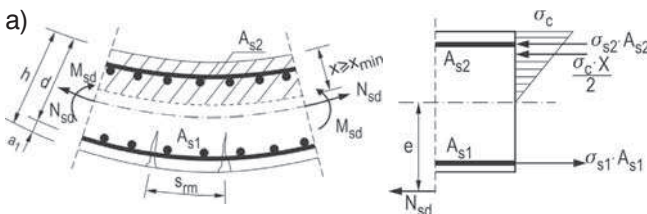
$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (13)$$

Naprężenia σ_s oblicza się w poziomym zbrojeniu rozciągającym, według teorii fazy II, w przekroju rozciągającym (z małym lub dużym mimośrodem) ściany silosu.

Z analizy problemu wynika, że podstawową trudność obliczeniową stanowi wyznaczenie naprężeń w zbrojeniu rozciągającym (w przypadku dużego mimośrodowo) lub zbrojeniu bardziej rozciągającym (przy małym mimośrodku). Układy obliczeniowe pokazano na rysunku 4.

4.2.1. Przypadek rozciągania ściany z dużym mimośrodem

W pierwszej kolejności należy określić zasięg strefy ściskanej x . W przekroju pionowym (rys. 4a) ściany o grubości h i szerokości b , zbrojonej symetrycznie



Rys. 4. Układy sił rozciągających ścianę walcowego silosu w przypadku: a) dużego mimośrodowo, b) małego mimośrodowo

($A_{s1} = A_{s2} = A_s$), według teorii naprężeń liniowych (faza II), konieczne jest rozwiązanie równania 3. stopnia

$$x^3 - 3x^2(e + 0,5h) - 12x \frac{\alpha_e A_s e}{b} + \frac{6\alpha_e A_s}{b} \cdot [eh - (0,5h - a_1)(d - a_1)] = 0 \rightarrow x \quad (14)$$

gdzie:

$$\alpha_e = E_s / E_{cm}, \quad e = M / N \quad (15)$$

W przypadku silosów zaliczonych do 2 lub 3 klasy szczelności należy sprawdzić warunek

$$x \geq 50 \text{ mm} \text{ oraz } x \geq 0,2h \quad (16)$$

Przy znanej wartości x naprężenie σ_s oblicza się w przekroju zarysowanym według teorii II fazy, w zależności od naprężeń σ_c w skrajnym włóknie betonu ściskane go ze wzoru

$$\sigma_s = \alpha_e \sigma_c \frac{d - x}{x} \quad (17)$$

gdzie

$$\sigma_c = \frac{N \cdot e}{\frac{1}{2} x \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3} \right) + \frac{\alpha_e A_s}{x} \left(\frac{h}{2} - a \right) (d - a)} \quad (18)$$

Występujący we wzorze (12) maksymalny rozstaw rys, wg [5] oblicza się z ogólnego wzoru

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (19)$$

gdzie c – oznacza wymiar otuliny zbrojenia, a $\rho_{p,eff}$ – określony w PN-EN 1992-1-1 [5] stopień zbrojenia, obliczony dla efektywnego pola strefy rozciąganej ściany.

W rozważanym przypadku ściany zbrojonej prętami o średnicy ϕ ze stali żebrowanej, podstawiono zalecaną wg [5] wartość współczynnika $k_1 = 0,8$ oraz zalecane wartości pozostałych współczynników: $k_2 = 0,5$ (w przypadku rozciągania z dużym mimośrodem), $k_3 = 3,4$ oraz $k_4 = 0,425$; otrzymano następujące wyrażenie

$$s_{r,max} = 3,4c + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} = 3,4c + 0,17 \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (20)$$

Przyjmując wg [5] zasadę wyznaczania efektywnego pola strefy rozciąganej, w rozpatrywanym przypadku ściany silosu rozciąganego z dużym mimośrodem, wzór na efektywny stopień zbrojenia $\rho_{p,eff}$ można przekształcić do postaci

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_{s1}}{1,0 \cdot 2,5(c + 0,5\phi)} = \frac{0,25n(\pi\phi^2)}{2,5(c + 0,5\phi)} = 0,1 \frac{n\pi\phi^2}{c + 0,5\phi} \quad (21)$$

W powyższym wzorze n – oznacza liczbę prętów o średnicy ϕ [m], przyjętych w strefie rozciąganej na jednostkę wysokości przekroju pionowego ściany.

Uwzględniając wzór (21) dla rozciąganej ściany silosu, normowy wzór (20) na odległość rys pionowych w ścianie silosu można przekształcić do formy

$$s_{r,max} = 3,4c + 0,17 \frac{\phi}{0,1n\pi\phi^2} = 3,4c + 1,7 \frac{c + 0,5\phi}{n\pi\phi} =$$

$$= 3,4 \left(c + \frac{c + 0,5\phi}{2n\pi\phi} \right) \quad (22)$$

Na podstawie wartości σ_s , $\rho_{p,eff}$ i $s_{r,max}$, szerokość rysy wyznacza się ze wzoru (12).

4.2.2. Przypadek rozciągania ściany z małym mimośrodem

W przypadku małego mimośrodu, w przekroju ściany silosu nie występuje strefa ściskana. Naprężenia σ_s w zbrojeniu bardziej rozciągającym przy symetrycznym układzie zbrojenia oblicza się według II fazy. W danym przypadku naprężenie to można wyrazić wzorem

$$\sigma_s = \frac{N}{bh} \left[\frac{1}{1 + \alpha_e \rho_s} + \frac{6e}{h(1 + 3\alpha_e \rho_s)} \right] \quad (23)$$

gdzie ρ_s oznacza sumaryczny stopień zbrojenia poziomego ściany silosu: $\rho_s = A_s/bh$.

W przypadku rozciągania z małym mimośrodem wg [5], współczynnik k_2 do obliczenia rozstawu rys ze wzoru (19), musi być wyznaczony w zależności

od maksymalnego ε_1 i minimalnego ε_2 odkształcenia rozciągającego w skrajnych włóknach przekroju ściany

$$k_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2\varepsilon_1} \quad (24)$$

Przyjmując powyższe założenia można w tym przypadku współczynnik k_2 zapisać wzorem

$$k_2 = 0,5 + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = 0,5 + \frac{0,25h + 0,5e}{0,5h - e} \quad (25)$$

W wyniku tego zapisu ulega zmianie wyrażenie (20) na odległość między rysami. Pozostałe obliczenia wykonuje się identycznie jak w przypadku rozciągania z dużym mimośrodem.

5. Podsumowanie

W artykule przeanalizowano wymagania Eurokodów w zakresie kontroli zarysowania ścian żelbetowych silosów cylindrycznych. Opisano zasady wyznaczania momentów zginających w płaszczyźnie równoleżnikowej cylindrycznego silosu pod wpływem mimośrodowego opróżniania bądź napełniania komory, co wywołuje rozciąganie mimośrodowe przekrojów. Skomentowano zasady klasyfikacji szczelności silosów, podane w PN-EN 1992-3:2008. Wyjaśniono, że z uwagi na założenia obliczeniowe, korzystanie z uproszczonej kontroli zarysowania w silosach żelbetowych praktycznie nie jest możliwe.

Na podstawie założeń normy PN-EN 1992-1-1:2008 wyprowadzono wzory na naprężenia w mimośrodkowo rozciągającym przekroju ściany oraz uściślono wzory na rozstaw rys pionowych, umożliwiające zastosowanie procedur obliczania szerokości rys, w zależności od klasy szczelności ściany silosu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Martens P., Silo-Handbuch. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1988
- [2] Łapko A., Zarysowania w żelbetowych zbiornikach na ciecze – problem obliczeniowy i technologiczny. Wydania XIII Konferencji „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, Wrocław – Szklarska Poręba, 2007, CD-ROM
- [3] PN-EN 1991-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki
- [4] PN-EN 1992-3:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze
- [5] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [6] DIN 1055 Teil 6: Lastannahmen für Bauten, Lasten In Silozellen. Mai 1987
- [7] Kobiak J., Stachurski W., Konstrukcje żelbetowe. Tom 4, Arkady, Warszawa, 1991
- [8] PN-B-03262:2002 Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja



Fot. 1. Widok zarysowanej ściany żelbetowej w silosie cylindrycznym