

dr hab. Eur. Inż. Tomasz Błaszczyński, prof. nadzw. PP<sup>1)</sup>\*

dr inż. Michał Babiak<sup>1)</sup>

dr inż. Przemysław Wielentejczyk<sup>1)</sup>

# Wykorzystanie metod numerycznych do analizy zniszczeń wywołanych pożarem silosu na biomasę

*Numerical methods advantage to the analysis of destructions caused by the fire of the silo for the biomass*

DOI: 10.15199/33.2015.09.11

(Studium przypadku)

**Streszczenie.** W wyniku pożaru trocin uległa uszkodzeniu konstrukcja żelbetowego silosu na biomasę znajdującego się na terenie zakładu produkującego płyty wiórowe. Wizja lokalna ujawniła osłabienia elementów konstrukcyjnych, ich pęknięcia oraz zniszczone fragmenty otuliny. Autorzy przeprowadzili analizę numeryczną symulacji pożaru w silosie. Porównano wyniki obliczeń numerycznych z rzeczywistym mechanizmem zniszczenia konstrukcji wywołanym pożarem. Przeprowadzono stosowne obliczenia statyczne oraz zaproponowano sposób wzmocnienia i naprawy silosu.

**Słowa kluczowe:** silos, beton, naprawa, pożar.

**Abstract.** As effect of sawdust fire the of reinforced concrete biomass containing silo made of reinforced concrete located in a chipboard factory was damaged. The authors analyzed numerical simulation of fire in silo. The result of numerical simulation and the actual mechanism of the structure destruction caused by the fire were compared and analyzed. The appropriate way of strengthening and repairing of the silo was suggested.

**Keywords:** silo, concrete, repair, fire.

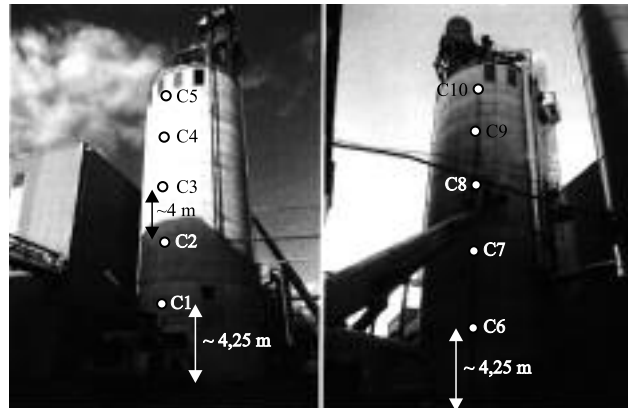
Wprowadzenie do praktyki oprogramowania inżynierskiego opartego na MES umożliwiło szczegółową analizę nawet najtrudniejszych konstrukcji w przypadku oceny ich awarii, a nawet propozycji naprawczych [1]. Szczególnie jest to ważne w momencie awarii tak nietypowych konstrukcji, jak silosy betonowe. Taki przypadek miał miejsce we Francji, gdy wykonany w 2009 r. silos na trociny uległ awarii w wyniku pożaru w 2014 r. Dane techniczne obiektu i zastosowane rozwiązania konstrukcyjne opisaliśmy w artykule *Naprawa zniszczeń wywołanych pożarem żelbetowego silosu na biomasę* [2] opublikowanym na str. 61 – 62. Przedstawiono w nim i oceniono stan techniczny zbiornika oraz zaproponowano sposób naprawy. W tym artykule zaprezentujemy analizę numeryczną symulacji pożaru zbiornika, porównanie wyników obliczeń numerycznych z rzeczywistym mechanizmem zniszczenia konstrukcji wywołanym pożarem oraz stosowne obliczenia statyczne i zaproponowany sposób wzmocnienia i naprawy silosu.

## Badania laboratoryjne

W celu oceny stanu technicznego zastosowanego betonu pobrano jego próbki w postaci odwiertów [3]. Na całej wysokości silosu wykonano 10 odwiertów w ścianach „na pełną” ich grubość. Próbki ponumerowano od C1 do C10 i opisano zgodnie z fotografią, a następnie przygotowano do badań przez przycięcie do normowych wymiarów oraz oczyszczenie. Określono wytrzymałość betonu na ściskanie. Analiza wyników badań wykazała duży spadek tego parametru w przypadku następujących lokalizacji: C5 – spadek o ok. 35%; C10 – spadek o ok. 34%; C9 – spadek o ok. 31%; C4 – spadek o ok. 10%.

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

<sup>\*</sup> Autor do korespondencji: e-mail: tomasz.blaszczyński@put.poznan.pl



Miejsca pobrania próbek betonu ze ścian silosu [3]

Places of concrete sample receivings from walls of the silo [3]

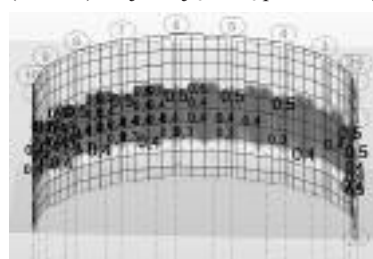
Pozostałe próbki miały wytrzymałość średnią zgodną z zaprojektowaną i wykonaną klasą betonu. Analizując ślady sadzy, złuszczenia otuliny, lokalizację i rozwartość poziomych rys na zewnętrznej części ściany oraz wyniki wytrzymałości betonu na ściskanie, stwierdzono, że zasięg i skutki pożaru ograniczyły się jedynie do górnej części silosu (> 15 m).

## Analiza konstrukcji silosu po awarii

W celu oceny stanu technicznego silosu po awarii przeanalizowaliśmy otrzymaną dokumentację techniczną [4] oraz wyniki badań niszczących betonu, które mogły być podstawą do obliczeń statycznych konstrukcji. Obliczenia zostały wykonane w programie Autodesk Robot Structural Analysis z użyciem modułu do projektowania powłok. Schemat statyczny konstrukcji uwzględnił sposób posadowienia zbiornika na płycie żelbetowej. W obliczeniach pominięto wpływ górnej płyty stropowej, gdyż nie została ona

konstrukcyjnie powiązana ze ścianami. Była swobodnie podparta, a jej stan techniczny po pożarze wskazywał jedynie na rozbiorke, dlatego też przyjęto bardziej niekorzystny schemat statyczny, który nie uwzględniał górnej płyty stropowej. Analizę konstrukcji wykonaliśmy, przyjmując następujące obciążenia: ciężar własny konstrukcji, 50% parcia i ciężaru trocin oraz obciążenie temperaturą, które symulowały warunki panujące podczas pożaru. Nie została wykonana analiza dynamiczna, gdyż nie doszło do wybuchu.

Analiza wyników obliczeń wykazała znaczne przekroczenie stanu granicznego użyteczności ściany górnej części komory (> 15 m), objawiające się przede wszystkim powstaniem rys poziomych. Rozkład rys pokrywał się z ich rzeczywistym przebiegiem stwierdzonym podczas oględzin konstrukcji. Wyniki analiz przedstawiono na rysunku 1, na którym uwi- doczniono zarysowania poziome, otrzymane podczas obliczeń stanu granicznego użyteczności.



**Rys. 1.** Wyniki obliczeń stanu granicznego użyteczności dla fragmentu zbiornika powyżej 10 m – szerokość rozwarcia rys poziomych [dane autorów]

Fig. 1. Calculation results of the ultimate utility state for the silo fragment above 10 m – opening width of the horizontal cracks [done by authors]

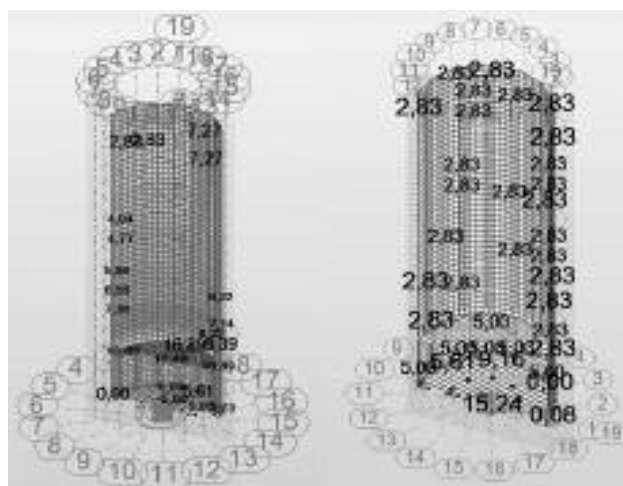
Należałoby oczywiście przewidzieć powstanie rys pionowych na skutek rozprężenia się zbiornika, gdyż ściany w pionie mają względną swobodę przemieszczenia. Ze względu na wysoki stopień zbrojenia poziomego projektowanego na wybuch biomasy, które zabezpieczyło silos przed spełkaniami, tak się nie stało.

Bardzo rzadki rozstaw prętów pionowych (tj.  $\phi 8$  co 30 cm) spowodował efekt przeciwny do przewidywanego. Okazało się, że pionowe pręty zbrojeniowe, traktowane w przypadku ścian silosu jako rozdzielcze, powinny stanowić istotny element zabezpieczający przed skutkami pożaru i nie należy ich przyjmować tylko konstrukcyjnie. Oględziny konstrukcji oraz wyniki analiz obliczeniowych wykazały, że silos nie nadaje się do dalszej eksploatacji, a ponowne wypełnienie zbiornika trocinami groziło awarią budowlaną.

## Analiza konstrukcji silosu w celu określenia metody naprawczej

Przed wykonaniem projektu naprawy silosu przeprowadziliśmy niezbędne analizy na podstawie wyników obliczeń statycznych wykonanych, tak jak poprzednio w programie Autodesk Robot Structural Analysis, z użyciem modułu do projektowania powłok. Tworząc model numeryczny silosu, uwzględniono osłabienie materiałów, czyli głównie spadek wytrzymałości betonu na ściskanie (zgodnie z wynikami badań niszczących) oraz spadek sztywności konstrukcji (spowodowany licznymi rysami). Analizę konstrukcji wykonaliśmy, uwzględniając następujące obciążenia: parcie i ciężar trocin, obciążenie wiatrem (2 strefa wg NF EN 1991-1-4 [5]), urządzeniami technologicznymi oraz temperaturą (różnicowane nasłonecznienie obiektu). Wykonana została kombinatoryka obciążeń, a obliczenia prowadzono w przypadku silosu pustego oraz wypełnionego w 50% i 100% (rysunek 2).

Na podstawie przeprowadzonych analiz zaproponowaliśmy naprawę konstrukcji silosu, która polegała na zwiększeniu grubości elementów konstrukcyjnych przez natrysk betonu (torkretowanie) oraz dodanie odpowiedniej powierzchni nowego zbrojenia konstrukcyjnego. Zalecono odbudowę ściany górnej komory (od stro-



**Rys. 2.** Przykładowe wyniki obliczeń w postaci ilości niezbędnego zbrojenia ( $\text{cm}^2$ ) od obciążenia: a) biomasa; b) wiatrem (zbiornik pusty) [dane autorów]

Fig. 2. Example-results of calculations in the form of the quantity of the necessary reinforcement ( $\text{cm}^2$ ) from the loading: a) from the biomass; b) from the wind (the empty silo) [done by authors]

ny wewnętrznej i zewnętrznej), ściany dolnej komory technicznej (od strony zewnętrznej), płyty stropowej rozdzielającej komory (od strony górnej komory składowej) oraz całkowitą odbudowę górnej płyty stropowej [2].

## Podsumowanie i wnioski

Zebrana dokumentacja techniczna i otrzymane wyniki badań niszczących betonu umożliwiły wykonanie niezbędnych obliczeń statycznych konstrukcji, zarówno w przypadku konstrukcji po awarii, jak i w celu opracowania niezbędnego projektu naprawy.

Analiza porównawcza wyników obliczeń statycznych (naprężeń rozciągających) z istniejącą konstrukcją (przebieg rys) wykazała zgodność modelu numerycznego ze stanem faktycznym. Dominujący poziomy kierunek rys jest zgodny z bardzo rzadkim rozstawem prętów pionowych (tj.  $\phi 8$  co 30 cm). Pionowe pręty zbrojeniowe ścian silosu, traktowane jako rozdzielcze, powinny stanowić istotny element zabezpieczający przed skutkami pożaru i nie należy ich przyjmować tylko konstrukcyjnie.

Wyniki obliczeń wykazały, że w stanie obecnym silos nie nadaje się do dalszej eksploatacji, a ponowne wypełnienie zbiornika trocinami grozi awarią budowlaną. Na podstawie kolejnych analiz zaproponowaliśmy sposób naprawy zbiornika w postaci zwiększenia grubości elementów konstrukcyjnych przez natrysk betonu (torkretowanie) oraz dodanie nowego zbrojenia konstrukcyjnego.

## Literatura

- [1] Błaszczyński T., Sielicki P.: Seismic vulnerability assessment of masonry tower with water tank, Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering – COMPDYN 2007, Kreta, 2007, 352 + CD.
- [2] Błaszczyński T., Babiak M., Wielentejczyk P., Naprawa zniszczeń wywołanych pożarem żelbetowego silosu na biomase, Materiały Budowlane nr 9/2015, str. 61 – 62.
- [3] Silo à sciere en béton armé sur le site de CASTELJALOUX, Diagnostic structurel suite à un incendie, Ginger CEBTP Domaine de Pelus 19 Avenue Pythagore 33700 Merignac.
- [4] Projekt wykonawczy żelbetowy silos na biomase z osprzętem stalowym, Jednostka projektowania: Przedsiębiorstwo „KRIZAR” ul. Hebanowa 32 55-080 Smolec.
- [5] NF EN 1991-1-4/NA (Mars 2008). Eurocode 1: Actions sur les structures – Partie 1-4: Actions générales – Actions du vent (Annexe nationale à la NF EN 1991-1-4: 2005).
- [6] Runkiewicz L.: Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2011.

Przyjęto do druku: 18.08.2015 r.