

Analiza stanu technicznego baterii silosów na sadzę

ZDZISŁAW PISAREK*, ANDRZEJ WOJNAR
Politechnika Rzeszowska

Streszczenie: W referacie przedstawiono sposób przeprowadzenia ekspertyzy dotyczącej aktualnego stanu technicznego silosów i konstrukcji wsporczej silosów znajdujących się w zakładach przemysłowych zlokalizowanych w południowo-wschodniej części Polski. W dalszej części tekstu przedstawiono wnioski wynikające z ekspertyzy, weryfikację spełnienia przez konstrukcję wymogów stanu granicznego nośności oraz wykazanie przydatności do dalszej eksploatacji i ewentualnie ustalenie zakresu potrzebnych prac naprawczych.

Słowa kluczowe: konstrukcje metalowe, konstrukcje żelbetowe, silosy stalowe

1. Przedmiot i zakres referatu

W referacie przedstawiono sposób przeprowadzenia ekspertyzy dotyczącej stanu technicznego konstrukcji silosów stalowych znajdujących się na terenie zakładu przemysłowego zlokalizowanego w południowo-wschodniej części Polski. Zamieszczono również wybrane wyniki przeprowadzonych pomiarów, założenia obliczeniowe, sposób wykonania i rezultaty sprawdzających obliczeń statyczno-wytrzymałościowych dotyczących stanu granicznego nośności konstrukcji, oraz wykazanie przydatności do dalszej eksploatacji i ewentualnie ustalenie zakresu potrzebnych prac naprawczych. Zakres referatu obejmuje opis:

- opis inwentaryzacji konstrukcji obiektu w zakresie ustalonym ze Zleceniodawcą,
- ocenę stanu konstrukcji stalowej silosów i ich żelbetowej konstrukcji wsporczej,
- wstępną weryfikację stanu technicznego 12 silosów i wybór 6 szt. do koniecznych dalszych badań,
- badanie stanu technicznego wytypowanych wcześniej 6 szt. (pomiar grubości ścianek stalowych komór, badanie stanu technicznego ścianek powłoki walcowej i leja stożkowego od strony zewnętrznej),
- sprawdzenie szczelności połączeń stalowych spawanych, wzmocnień i złącz, oraz połączeń konstrukcji z elementami przekrycia stropu nad silosami,
- sprawdzenia poprawności wykonania szybu (konstrukcja + obudowa) z przesyłem pneumatycznym sadzy,
- analizy przyczyn powstania uszkodzeń i zalecenia.

*Autor do korespondencji: pisarzd@prz.edu.pl; awojnar@prz.edu.pl

2. Skrócony opis techniczny baterii silosów

Bateria silosów pełniąc funkcję magazynu na sadzę znajduje się na terenie firmy zlokalizowanej w południowo-wschodniej części Polski. Obejmuje ona 12 silosów o pojemności 275 m³, oraz zaplecze do załadunku i rozładunku. W magazynie będącym baterią silosów przechowuje się sadzę, krzemionkę i kredę.

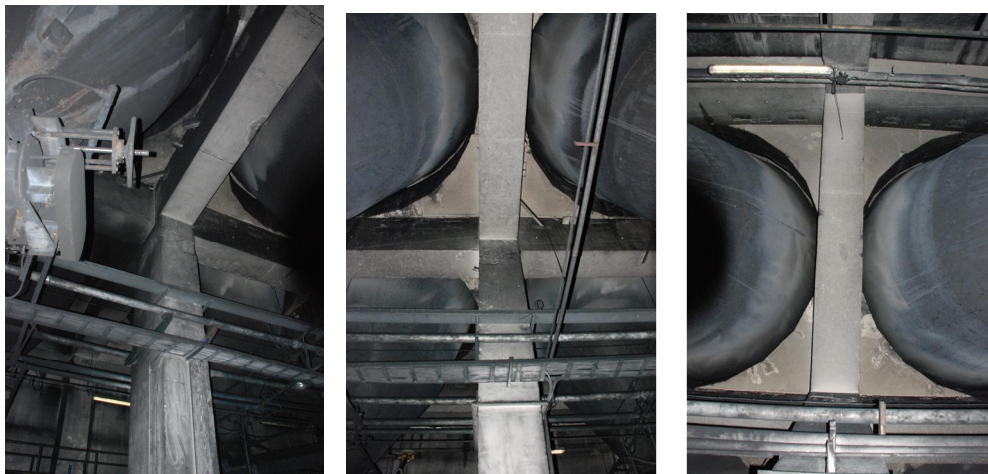
Bateria silosów zajmuje centralne miejsce obiektu. Od południa dostawione jest do niej pomieszczenie podszybia oraz klatka schodowa z dwoma szybami instalacyjnymi. Od strony północnej znajduje się pomieszczenie rozładunkowe, a nad nim klatka schodowa. Wszystkie trzy części są na górze połączone ze sobą halą filtrów, z której jest przejście do sąsiedniego budynku.



Rys. 1. Widok baterii silosów.

Konstrukcję wsporczą silosów stanowi żelbetowa rama monolityczna o wymiarach w rzucie 36,70' 12,80 m i wysokości 9,6 m ponad poziom płyty fundamentowej. Żelbetowe słupy ramy są rozmieszczone w siatce 6,0' 6,0 m i mają przekrój 70' 80 cm (słupy skrajne) i 70' 120 cm (słupy środkowe). Wysokość słupów w świetle wynosi 7,25 m. Słupy połączone są między sobą na górze rusztem żelbetowym o przekroju belek 70' 120 cm. Na belkach rusztu wylany jest nadbeton i płyta stropowa gr 60 cm jako wypełnienie przestrzeni w narożach rusztu od leja silosu. Na płycie ułożona jest warstwa spadkowa i izolacja przeciwwodna w postaci papy. Obudowa konstrukcji wsporczej jest wykonana z prefabrykowanych żelbetowych płyt ściennych mocowanych do marek w słupach żelbetowych ramy. Na ścianie frontowej są dwa rzędy stalowych okien przemysłowych.

Bateria silosów składa się z dwunastu identycznych silosów walcowych o wysokości 12,0 m. i średnicy 5,40 m każdy. Płaszcz silosów składa się z ośmiu segmentów blach o wysokości 1,5 m każdy. Segmenty są wykonane z blach o dwóch grubościach – najprawdopodobniej początkowo przyjęto 12 i 10 mm. Na wysokości płaszcza komory wzmocniony jest za pomocą czterech obejm wykonanych z ceownika C240. Na dole płaszcza wykonany jest pierścień dolny o wysokości 730 mm złożony z dwóch blach i uźebrowany 40 żeberkami z blachy o grubości 16 mm. Pierścień ten służy do oparcia silosu na żelbetowej ramie konstrukcji wsporczej. Dodatkowo pierścień jest przymocowany do konstrukcji wsporczej za pomocą 12 śrub M24. Na górze płaszcza silosu wykonany jest pierścień o wysokości 500 mm i usztywniony ośmioma żebrami. Na tym pierścieniu oparty jest ruszt stalowy podłogi hali filtrów. Sama podłoga oparta jest na kątowniku usztywniającym blachę płaszcza i zwykle nie jest bezpośrednio z nim połączona. Do pierścienia dolnego jest przymocowany stalowy lej zakończony zasuwą i ślimakiem do opróżniania silosu. Silosy nie mają włazów ani drabinki wewnętrznej. Na poziomie 6,67 m, na całej długości baterii silosów znajduje się galeria do obsługi silosów.



Rys. 2. Widok żelbetowej konstrukcji wsporczej i płyty stropowej baterii silosów.



Rys. 3. Widok konstrukcji stalowej – powłoka walcowa i lej stożkowy baterii silosów.

Konstrukcja klatki schodowej opiera się na sześciu stalowych słupach z dwuteowników spawanych HKS 700-11-300-30. Słupy te są stężone za pomocą rygli wykonanych z dwuteowników IPN240 oraz stężeń z kątowników L150' 15 i L100' 8. Słupy klatki południowej opierają się na żelbetowych słupach podszycia, natomiast klatki północnej na słupach terminala rozładunkowego. Stalowe słupy klatki schodowej stanowią, poza silosami, podparcie hali filtrów. W obydwu klatkach, po stronie zachodniej znajdują się stalowe schody z poręczą. Schody te są dojściami do hali filtrów. W klatce południowej znajduje się pomost rewizyjny i dwa szyby instalacyjne „większy” o wymiarach 3,0' 2,4 m i mniejszy 1,5' 1,5 m. Konstrukcja szybów jest wykonana z kształtowników będących słupami i rygli z ceowników stanowiących bezpośrednie podparcie blachy obudowy. Obydwa szyby mają drzwi rewizyjne na poziomie płyty podszycia i na wysokości galerii rewizyjnej – w połowie wysokości.



Rys. 4. Widok klatki schodowej.

Hala filtrów znajduje się nad silosami i klatkami schodowymi. Konstrukcję podłogi stanowi ruszt stalowy z dwuteownika HKS 500-10-300-30 jako belka obwodowa, poprzecznie z dwuteownika IPN 300, oraz belek z dwuteowników IPN 160. Na ruszcie wylana jest posadzka na blasze o grubości 20 cm. Wierzchnią warstwę posadzki stanowi posadzka przemysłowa żywiczna. Główne ramy nośne wykonane z kształtownika HKS 500' 10' 300' 30. Opierają się na belce obwodowej są one rozstawione co 6,0 m. Rozpiętość ram wynosi 12,0 m a wysokość w okapie 5,0 m. Ramy te stanowią podparcie dla rygli obudowy z 2 ceowników C120 zespawanych w rurę i płatwi które są zaprojektowane z dwuteowników IPN 240. Płatwie są ustawione w rozstawie co 3,0 m, natomiast rygle ścienne co 1,2 m. Do rygli i płatwi jest mocowana blacha poszycia. Do ram przymocowana jest konstrukcja wsporcza instalacji i urządzeń, oraz pomosty robocze. Z hali filtrów prowadzi galeria do sąsiedniego budynku w której bieżą instalacje.



Rys. 5. Widok baterii silosów i hali filtrów (nad baterią).

Od północnej strony znajduje się budynek terminala rozładunkowego. Terminal wykonany jest w technologii prefabrykatów żelbetowych i nie wchodzi w zakres opinii.

3. Pomiary grubości płaszcza silosów

Pomiar grubości płaszcza silosów przeprowadzono na czterech poziomach tj., na poziomie płyty nad konstrukcją wsporczą, pomiędzy uźebrowaniem pierścienia dolnego i nad jego pasem górnym. Wykonano również pomiary dostępne z pomostu pomiędzy silosami i grubości blach leja. Pomiary dokonano przy użyciu grubościomierza ultradźwiękowego TD 225-0,1-US firmy Sauter. Pomiary te miały na celu wybór silosów, które by odbiegały od pozostałych z uwagi na grubość płaszcza silosów.

Zauważono, że wyniki pomiarów nie różnią się od siebie w znaczny sposób. Średnie wartości grubości blach oscylują w granicach 8–10 mm, a wartości pomierzone wahają się od 7,7 do 11,0 mm. Różnica ta wynika to raczej z pierwotnej grubości blach zastosowanych na płaszczy, niż z ubytków korozyjnych czy eksploatacyjnych.

Tablica 1. Wyniki pomiarów grubości blach wybranych silosów

Silos nr 2.						Silos nr 4.					
Poziom	Pomiar grubości			średnia	odch. strd.	Poziom	Pomiar grubości			średnia	odch. strd.
12,00	10,8	10,7	10,8	10,77	0,05	12,00	10,6	10,5	10,5	10,53	0,05
	11,0	10,8	10,9	10,90	0,08		10,5	10,5	10,5	10,50	0,00
10,50	10,5	10,5	10,4	10,47	0,05	10,50	10,7	10,4	10,3	10,47	0,17
	8,3	8,5	8,3	8,37	0,09		8,4	8,6	8,4	8,47	0,09
10,30	8,5	8,4	8,5	8,47	0,05	10,30	8,6	8,8	8,5	8,63	0,12
10,00	8,3	8,2	8,4	8,30	0,08	10,00	8,8	8,2	8,5	8,50	0,24
	8,3	8,2	8,2	8,23	0,05		8,3	8,5	8,5	8,43	0,09
9,00	8,2	9,1	8,9	8,73	0,39	9,00	8,6	8,8	8,8	8,73	0,09
	8,0	8,8	8,9	8,57	0,40		8,8	8,4	7,9	8,37	0,37
8,15	8,3	7,9	7,8	8,00	0,22	8,15	8,3	8,3	8,5	8,37	0,09
	8,5	8,5	8,3	8,43	0,09		9,0	9,2	9,4	9,20	0,16
7,50	8,4	8,5	8,3	8,40	0,08	7,50	8,3	8,4	8,8	8,50	0,22
	11,1	11,0	10,8	10,97	0,12		10,9	10,4	10,3	10,53	0,26
6,00	11,0	11,2	11,2	11,13	0,09	6,00	10,1	10,3	10,5	10,30	0,16
	11,0	10,9	10,9	10,93	0,05		10,2	10,4	10,4	10,33	0,09
5,40	10,9	10,8	10,9	10,87	0,05	5,40	10,0	10,3	10,4	10,23	0,17
	10,9	11,0	11,0	10,97	0,05		10,6	10,5	10,5	10,53	0,05
4,50	11,1	10,9	11,0	11,00	0,08	4,50	10,6	10,5	10,5	10,53	0,05
	10,9	10,7	10,9	10,83	0,09		10,4	10,5	10,6	10,50	0,08
3,00	10,9	10,7	10,7	10,77	0,09	3,00	10,6	10,6	10,5	10,57	0,05
	11,1	11,2	11,0	11,10	0,08		10,7	10,4	10,3	10,47	0,17
2,65	10,5	10,6	10,5	10,53	0,05	2,65	10,5	10,8	10,8	10,70	0,14
1,5	10,4	10,3	10,4	10,37	0,05	1,5	10,6	10,5	10,9	10,67	0,17
	10,3	10,5	10,5	10,43	0,09		10,8	10,9	10,8	10,83	0,05
0,8	10,4	9,9	10,3	10,20	0,22	0,8	10,4	10,9	10,9	10,73	0,24
0,4	10,6	10,4	10,4	10,47	0,09	0,4	10,0	10,1	10,1	10,07	0,05
Lej	9,5	9,6	9,8	9,63	0,12	Lej	9,6	9,8	9,5	9,63	0,12

Dlatego do drugiego etapu przyjęto najbardziej ekspozowane i odkształcone silosy. Pomiary dokonano 4 grudnia 2020 przy użyciu grubościomierza ultradźwiękowego TD 225-0,1-US firmy Sauter. Pomiary wykonano w miejscach najbardziej narażonych na korozję wżerową, czyli nad

i pod spoinami łączącymi poszczególne blachy, nad i pod pierścieniem usztywniającym oraz w środku blach płaszczu i na górze silosu. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli.

Zauważono że, blachy zastosowane od poziomu +7,50 do poziomu +10,50 mają skokową zmianę grubości, co świadczy o zastosowaniu tam cieńszej blachy.

4. Aktualny stan techniczny baterii silosów

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i oględzin, stwierdzono, że ogólny stan techniczny baterii silosów wraz z konstrukcją wsporczą i halą filtrów w magazynie sadzy należy uznać za dostateczny. Wnioski wynikające z oględzin przedstawiają się następująco:

Żelbetowa konstrukcja wsporcza jest w stosunkowo dobrym stanie. Nie zauważono żadnych rys czy odkształceń świadczących o jej przeciążeniu. Występują uszkodzenia naroży i warstw wyprawki, ale doraźnie nie stanowią one zagrożenia. Jednak przy zniszczeniu warstwy wyprawki, ogólnie zalegająca sadza może prowadzić do przyspieszonej karbonizacji betonu, a to do przyspieszonej korozji stali. Jakość wykonania żelbetowych elementów prefabrykowanych jest niska. Dodatkowo warunki atmosferyczne i sadza powodują korozję powierzchni betonu. Na chwilę obecną nie jest to groźne, jednak należy się spodziewać zwiększenia prędkości degradacji elementów żelbetowych. Należy zwrócić uwagę na izolację przeciwwodną płyt konstrukcji wsporczej i podszybia. Choć wydaje się w dobrym stanie, to na lejach są ślady przecieków.

Elementy stalowe konstrukcji wsporczej klatek schodowych nie wykazują znaczących odkształceń czy uszkodzeń. Lokalne wgięcia czy uszkodzenia nie wpływają na nośność elementów. Na słupach i stężeniach występują liczne uszkodzenia, złuszczenie powłok malarskich o zróżnicowanym stopniu. Występuje tam rdza o znacznej wartości produktów korozji. Jednak ta korozja ma charakter powierzchniowy i w małym stopniu powoduje degradację nośności elementów. Na pomostach stalowych zalegają resztki odchodów ptasich. Ze względu na kwaśny odczyn mogą one powodować zwiększoną prędkość korozji stali.

Szyby instalacyjne są w zdecydowanie różnym stanie. Szyb „większy” jest w stanie bardzo dobrym. Nie zauważono w nim oznak korozji czy uszkodzeń powłok malarskich, wgnieceń i innych defektów zmniejszających jego nośność. Na elementach również nie zalega warstwa grubsza sadzy, a jedynie niewielka jej ilość wynikająca z nieszczelności rurociągów. Możliwe jest także nawiewanie sadzy pod wpływem cyrkulacji powietrza z pomieszczenia podszybia lub hali filtrów. W zupełnie odmiennym stanie jest szyb „mniejszy”. Elementy konstrukcyjne szybu są „oblepione” sadzą. Blacha poszycia przy styku z płytą podszybia jest skorodowana tak, że doszło do jej perforacji. W szybie zalegają gałęzie i znaczne ilości sadzy która prawie całkowicie zamyka światło szybu.

Silosy są w zadowalającym stanie technicznym. Nie występują na nich ślady uszkodzeń czy pęknięć. Nie występuje na nich korozja wżerowa, choć w wielu miejscach na powierzchni zauważono całkowite uszkodzenie powłoki malarskiej i produkty korozji powierzchniowej. Nadmienić należy, że na wszystkich silosach zaobserwowano złuszczenie się zewnętrznych warstw farby, co może świadczyć o złym doborze zestawu malarskiego. Spoiny pomiędzy poszczególnymi blachami są wykonane w różną jakością. Jedne są wykonane prawidłowo inne z wadami kształtu. Część spoin jest szlifowana. Nie zaobserwowano jednak pęknięć lub nieszczelności w miejscach spoin. W kilku punktach spoiny są inicjatorem korozji, ale również i tam nie występują wżery korozyjne. Blachy płaszczu silosów są powyginane. Strzałka wygięcia niektórych blach przekracza znacznie wartość grubości blachy płaszczu. Wygięcia te są w obydwu kierunkach tj. na zewnątrz i do wewnątrz silosu. Szczególnie wyraźnie było to widoczne na silosie nr 2, gdzie takie wygięcia symetrycznie występują po dwóch stronach silosu. Występują również odkształcenia końca płaszczu silosu. Odkształcenia blach mogą

mieć więc związek z pracą silosu i zmieniać charakter podczas napełniania i opróżniania silosu. Blachy i pierścienie usztywniające wykonano w sposób niedbały. Zaobserwowano przesunięcie końców pierścienia o wartość większą niż grubość jego pasa. Występują niezaspawane nacięcia pasa pierścienia. Lecz nie zaobserwowano w tych miejscach oznak przeciążenia czy nadmiernych odkształceń. Na powierzchni poboczniczy silosów nie zauważono śladów sadzy, co świadczy o szczelności silosu. Wprawdzie na silosie nr 11 występuje lokalne zabrudzenie, ale jest ono rozproszone i trudno stwierdzić jego przyczynę. Leje silosów pokryte są w całości warstwą sadzy, ale wynika to z zapylenia jakie panuje w pomieszczeniu.

Podobnie jak na innych elementach stalowych, na elementach rusztu hali filtrów występują ślady korozji powierzchniowej. Poza tym nie występują tam żadne większe uszkodzenia. Żelbetowa płyta stropowa z posadzką przemysłową posiada spękania które mogły powstać na skutek ruchów silosów podczas napełniania i opróżniania. Stan techniczny stalowych elementów konstrukcyjnych takich jak ramy portalowe, płatwie i rygle uznano za dostateczny. Blachy obudowy ściennej są w niedostatecznym stanie technicznym. Występują na nich ślady korozji i perforacja w miejscu przejścia rurek instalacyjnych.

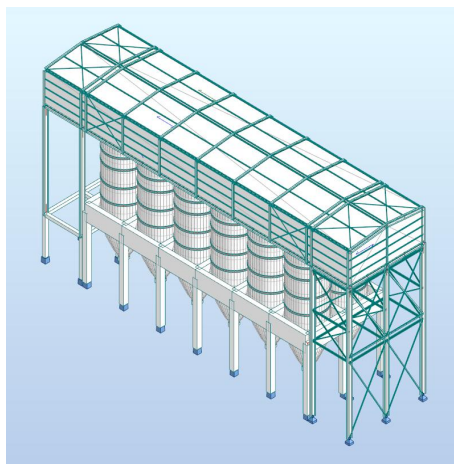
5. Sprawdzające obliczenia statyczno-wytrzymałościowe

Geometria konstrukcji

Komputerowy model obliczeniowy konstrukcji baterii silosów opracowano przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (MES). Wykonano model przestrzenny (3D, rys. 6) przy przyjęciu wymiarów geometrycznych i poziomów przedstawionych poniżej:

- poziom zamocowania słupów w fundamentach 0,00 m,
- poziom belek i płyty stanowiącej oparcie dla konstrukcji silosów +9,60 m,
- poziom płyty stanowiącej zwieńczenie (połączenie) góry silosów +20,64 m,
- poziom okapu konstrukcji stalowej nadbudówki nad silosami +25,44 m,
- poziom kalenicy konstrukcji stalowej nadbudówki nad silosami +26,04 m,
- rozstaw słupów w kierunku równoległym do dłuższego boku konstrukcji – 6,00 m,
- rozstaw słupów w kierunku prostopadłym do dłuższego boku konstrukcji – 6,00 m.

Wymiary i poziomy ujednolicono i zaokrąglono w stosunku do wymiarów pomierzonych w trakcie wizji lokalnych – stwierdzono, że nie wpływa to w sposób znaczący na wartości otrzymanych wyników).



Rys. 6. Przestrzenny model obliczeniowy konstrukcji baterii silosów.

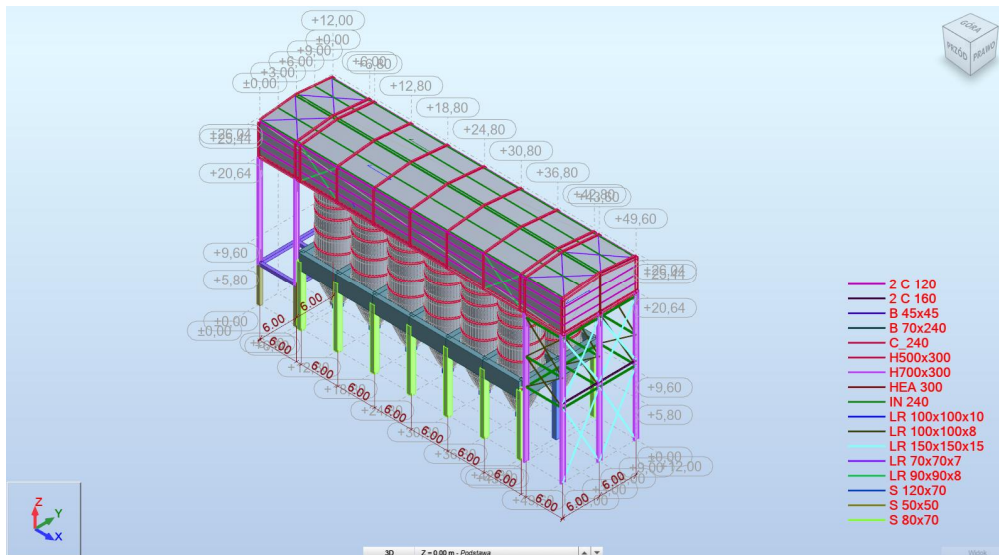
Typy zastosowanych elementów skończonych

W modelu obliczeniowym zastosowano elementy typu prętowego i powłokowego. Do modelowania poszczególnych części konstrukcji wykorzystano elementy skończone następującego typu:

- słupy, belki, pręty skratowań – zastosowano elementy skończone typu belkowego o 6-ciu stopniach swobody w węźle,
- płyty żelbetowe, powłokę stalową silosów – zastosowano elementy skończone typu powłokowego,
- obudowę ścienną nadbudówki i poszycie dachowe zamodelowano przy wykorzystaniu płaskich paneli pozwalających na rozdzielanie obciążeń klimatycznych od obciążenie śniegiem i oddziaływania wiatru na konstrukcję stalową nadbudowy.

Warunki podparcia – rodzaje podpór zastosowanych w modelu:

- podpory słupów żelbetowych zamodelowano jako podpory sztywne (utwierdzenie),
- podpory słupów stalowych zamodelowano jako podpory przegubowe, nieprzesuwne.



Rys. 7. Rodzaje i przekroje poprzeczne zastosowanych elementów

Bazując na pomiarach wykonanych podczas wizji lokalnej, przyjęto następujące przekroje poprzeczne głównych elementów konstrukcyjnych (rysunku 3):

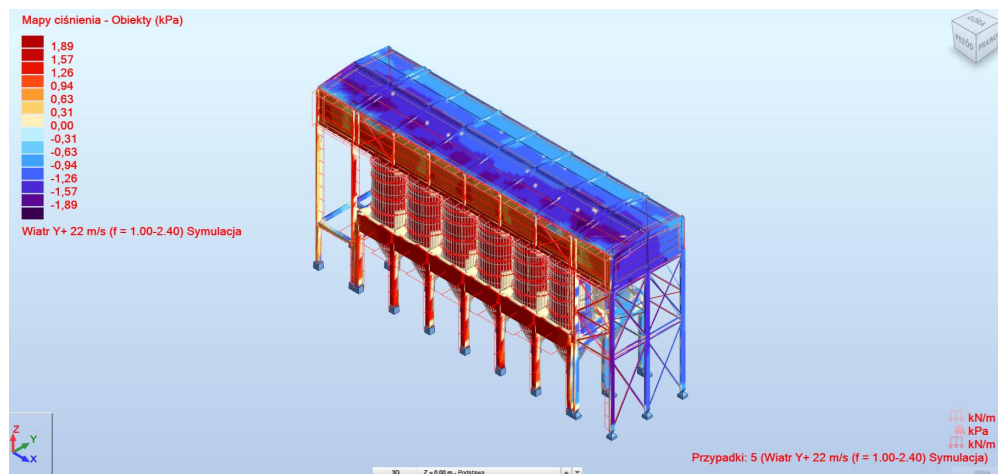
- słupy ścian bocznych równoległych do dłuższej osi budynku (płaszczyzna XZ): przekrój żelbetowy 80´70 cm,
- słupy środkowe w osi budynku (płaszczyzna XZ): przekrój żelbetowy 120´70 cm,
- belki w poziomie +9,60 (poziom oparcia komór silosów stalowych): przekrój żelbetowy 240´70 cm,
- płyta w poziomie +9,60 (poziom oparcia komór silosów stalowych): płyta żelbetowa o grubości 120 cm,
- płyta w poziomie +20,64 (górny poziom konstrukcji stalowej komór silosów, płyta stropowa nadbudówki): płyta żelbetowa o grubości 20 cm,
- elementy konstrukcji stalowej nadbudówki oraz konstrukcji nośnej schodów – przekroje poprzeczne jak na rysunkach przedstawiających inwentaryzację obiektu,
- konstrukcje płaszcza silosów zamodelowano przy wykorzystaniu elementów powłokowych,

- pierścienie usztywniające płaszcz silosów zamodelowano jako elementy prętowe o przekroju ceowym, w celu zapewnienia współpracy, połączone z elementami powłokowymi w węzłach siatki powłokowych elementów skończonych.

Obciążenia

Podczas obliczeń uwzględniono następujące przypadki obciążenia konstrukcji:

- obciążenie ciężarem własnym (słupy i belki żelbetowe, słupy i belki stalowe, pręty skrótowania, płyty żelbetowe, stalowa konstrukcja silosów) – wygenerowane automatycznie przez oprogramowanie komputerowe
- obciążenie stałe – obciążenie to uwzględnia:
 - masę poszycia dachowego nadbudówki – przyjęto 50 kg/m^2 ,
 - masę obudowy ściennej nadbudówki – przyjęto 50 kg/m^2 ,
 - uśredniony ciężar dwuteowników wchodzących w skład konstrukcji płyty wieńczącej górę silosów (płyta stropowa nadbudówki, poziom $+20,64 \text{ m}$) – przyjęto ciężar dwuteowników IPN300 wynoszący $0,35 \text{ kN/m}^2$, ciężar dwuteowników IPN160 wynoszący $0,16 \text{ kN/m}^2$.
- obciążenie śniegiem według normy PN-EN 1991-1-3 [1], o wartości $0,72 \text{ kN/m}^2$ w trwałej i przejściowej sytuacji obliczeniowej,
- obciążenie wiatrem według normy PN-EN 1991-1-4 [2]
- obciążenie konstrukcji parciem wiatru wygenerowano za pomocą symulacji obciążenia wiatrem. Wartość współczynnika zwiększającego prędkość (ciśnienie prędkości) wiatru wraz z wysokością, wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 1991-1-4, [2] przyjęto bazową prędkość wiatru o wartości 22 m/sec , wartość ciśnienia prędkości wiatru o wartości $0,30 \text{ kN/m}^2$,
- obciążenie ciężarem własnym sadzy (magazynowanego materiału) – parcie sadzy na ścianki komory i leja, oraz tarcie o ścianki wyznaczono według normy PN-EN 1991-4 [3], zgodnie z wytycznymi i procedurami opisanymi w Rozdziale 5 wspomnianej normy
- ciężar właściwej sadzy przyjęto o wartości 18 kN/m^3 , (zgodnie z informacjami zawartymi na stronie internetowej firmy Polsaros Sp. z o.o. – dostawcy surowców chemicznych przeznaczonych przede wszystkim dla przemysłów oponiarskiego, gumowego i kauczukowego [5]),
- wobec braku szczegółowych informacji – pozostałe parametry sadzy przyjęto zgodnie z Tablicą E.1 normy [3], jak dla „materiałów brakujących”.



Rys. 8. Obciążenie wiatrem, rozkład ciśnienia na powierzchni konstrukcji baterii silosów – wiatr wiejący zgodnie ze zwrotem osi Y.

Kombinatoryka obciążeń

Kombinacje obciążeń przyjęto zgodnie z normą PN-EN 1990 [4], według punktu 6.4.3.2 jak dla trwałych lub przejściowych sytuacji obliczeniowych, według wzorów:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \\ \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \end{array} \right.$$

Modele materiałów

W modelu obliczeniowym zastosowano liniowo-sprężyste modele materiałów – stal, beton.

Rodzaj przeprowadzonej analizy obliczeniowej

Obliczenia statyczne wykonano przy wykorzystaniu analizy liniowej, I-go rzędu.

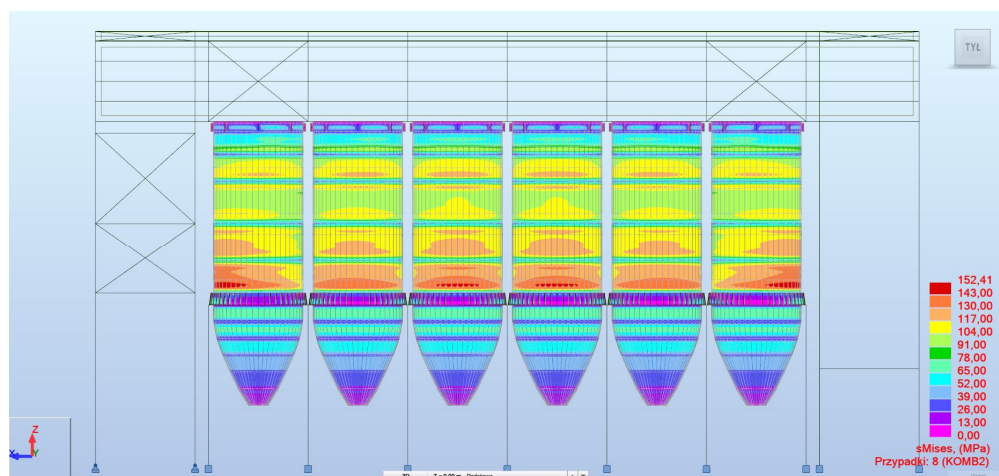
Wyniki obliczeń i wnioski

Wyniki obliczeń w postaci map naprężeń zastępczych w ściankach silosów, przedstawiono na poniższych. Wartości naprężeń wyznaczono według hipotezy wyężeniowej Misesa. Mapy naprężeń zastępczych przedstawiono w widoku ściany podłużnej tylnej (płaszczyzna XZ), dla tej ściany otrzymano ekstremalne wartości naprężeń.

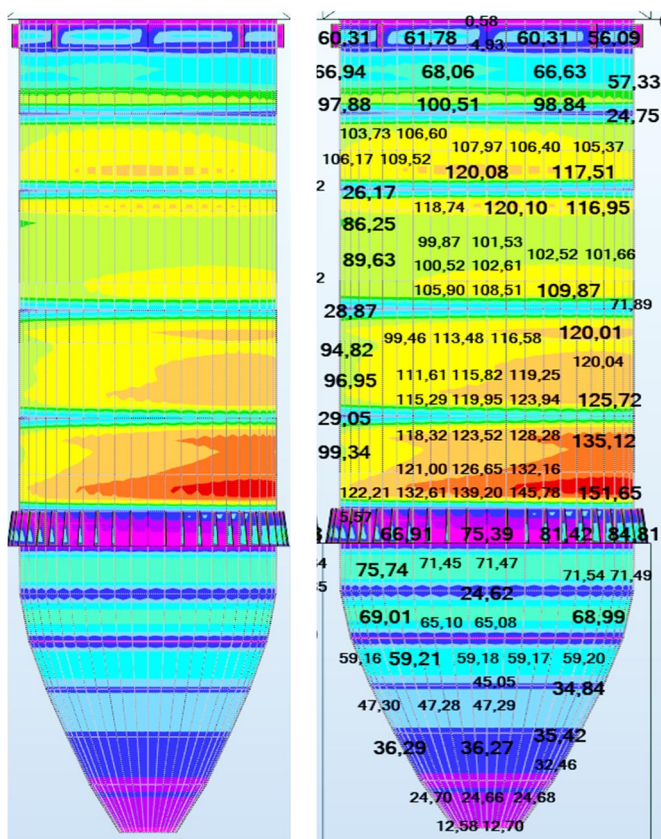
6. Wnioski końcowe

Ogólnie można stwierdzić, że stan techniczny bateria silosów wraz z konstrukcją wsporczą i halą filtrów w magazynie sadzy jest dostateczny. Na obiekcie są widoczne ślady jego około 40 letniej eksploatacji. Również stosowane w tym okresie materiały i technologie odbiegały od obecnych i nie wpływały pozytywnie na trwałość obiektu.

Ze względów konstrukcyjno-wytrzymałościowych zarówno część żelbetowa jak i stalowa jest w zadowalającym stanie. Nośność konstrukcji żelbetowej jest wykorzystana w około 50%. Nośność konstrukcji stalowej w 55%, natomiast maksymalna wartość naprężeń w płaszczu silosu wynosi 153 MPa, co wykorzystuje nośność w 65%.



Rys. 9. Mapa naprężeń zastępczych w stalowych ściankach silosów.



Rys. 10. Mapa naprężeń zastępczych w stalowych ściankach pojedynczego silosu.

Stan powierzchni elementów żelbetowych jest zły. Występują raki, uszkodzenia wyprawki oraz odspojenia i ukruszenia kawałków betonu. Nie jest to groźne dla bezpieczeństwa konstrukcji na tę chwilę, ale z biegiem czasu ta degradacja będzie się nasilać zwłaszcza, że atmosfera środowiska sprzyja zwiększonej karbonizacji betonu.

Stan stalowych elementów konstrukcyjnych jest zadowalający. Nie widać na nich oznak przeciążenia ani uszkodzeń. Natomiast stan powłok malarskich jest zły. W wielu miejscach widać ślady korozji atmosferycznej powierzchniowej. Degradację tych powłok zwiększa brak utrzymania odpowiedniej czystości w trudno dostępnych miejscach; np. na stopach słupów, czy ptasie gniazda na ruszcie płyty nad silosami. Na elementach stalowych w hali filtrów zalega warstwa sadzy. Z jednej strony stanowi ona warstwę ochronną, z drugiej strony przyspiesza starzenie stali, która obniża swoje parametry plastyczne.

Stan obudowy z blachy „mniejszego” szybu instalacyjnego i obudowy hali filtrów jest zły. Występują tam lokalne perforacje korozyjne blachy. Nie są to elementy konstrukcyjne, więc nie wpływa to na bezpieczeństwo konstrukcji, ale znacząco pogarsza estetykę obiektu.

Stan silosów jest dostateczny. Występują wygięcia blach płaszcza silosów, których strzałka przekracza grubość blach płaszcza. Spoiny i połączenia wykonano w sposób zróżnicowany i w większości niestaranny. Stan powłok malarskich jest zły. W wielu miejscach widać ślady korozji atmosferycznej powierzchniowej. Widoczne są przemieszczenia pierścienia krawędzi płaszcza o blasze płyty stropu. Jednak nie zaobserwowano znacznej redukcji grubości blach silosu i śladów korozji wżerowej.

7. Zalecenia dotyczące dalszej eksploatacji

Zaleca się, podczas badania, szczególną kontrolę żelbetowej konstrukcji wsporczej pod baterię silosów i słupów prefabrykowanych podszybia, oraz płaszcza silosów i słupów klatki schodowej.

Zaleca się utrzymanie odpowiedniego ładu i porządku w pomieszczeniach, redukując zapylenie, a zalegające poza instalacją obiegu zamkniętego substancje niezwłocznie usuwać.

Po każdym sezonie jesienno-zimowym należy wykonywać przeglądy stanu obiektu ze szczególnym zwróceniem uwagi na stan techniczny połączeń i powłok malarskich i izolacyjnych. Po przeglądzie należy wykonać niezbędne prace konserwacyjne.

Należy poprawić powłoki antykorozyjne elementów stalowych zarówno silosów jak i konstrukcji wsporczej klatek schodowych, oraz hali filtrów. Przed wykonaniem powłok malarskich należy powierzchnię elementów dokładnie oczyścić i odtłuścić.

Należy wykonać naprawę uszkodzonych fragmentów konstrukcji żelbetowej. Ubytki betonu należy wypełnić masą naprawczą, a powierzchnię pokryć powłoką odporną na oddziaływanie sadzy,

Literatura

1. PN-EN 1991-1-3. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem. PKN. 2005.
2. PN-EN 1991-1-4. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru. PKN. 2008.
3. PN-EN 1991-4. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki.
4. PN-EN 1990. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji. PKN. 2004.
5. <https://polsaros.com/pl/>

Analysis of the technical condition of the soot silo batteries

Key words: metal structures, reinforced concrete structures, steel silos