



Prof. dr hab. inż. Krzysztof DYDUCH
Dr inż. Marian PŁACHECKI
Dr inż. Rafał SIENKO
Mgr inż. Rafał SZYDŁOWSKI
Politechnika Krakowska

NAPRAWA I WZMOCNIENIE USZKODZONEJ PRZEZ KOROZJĘ ŻELBETOWEJ WIEŻY GRANULACYJNEJ W ZAKŁADACH AZOTOWYCH

REPAIR AND STRENGTHENING OF RC GRANULATION TOWER AT NITRIC FACTORY DAMAGED BY CORROSION

Streszczenie Wieża granulacyjna z prefabrykowanych elementów żelbetowych typu Monnoyer jest użytkowana około 50 lat. W konstrukcji wieży powstały uszkodzenia korozyjne wywołane długotrwałym oddziaływaniem agresywnego środowiska chemicznego. W referacie przedstawiono stan zagrożenia wywołany uszkodzeniami korozyjnymi oraz zastosowane naprawy i wzmocnienia przyjęte ze względu na przewidywany pięcioletni okres dalszej eksploatacji obiektu.

Abstract Granulation tower constructed from RC prefabricated elements of Monnoyer type has been operated for almost 50 years. As a result of long-term aggressive chemical environment actions onto the structure corrosion induced damages have occurred. In the paper there is presented the hazard state generated by corrosion damages as well as repairs and strengthening methods that have been proposed and applied taking into account the foreseen five year period of structure exploitation.

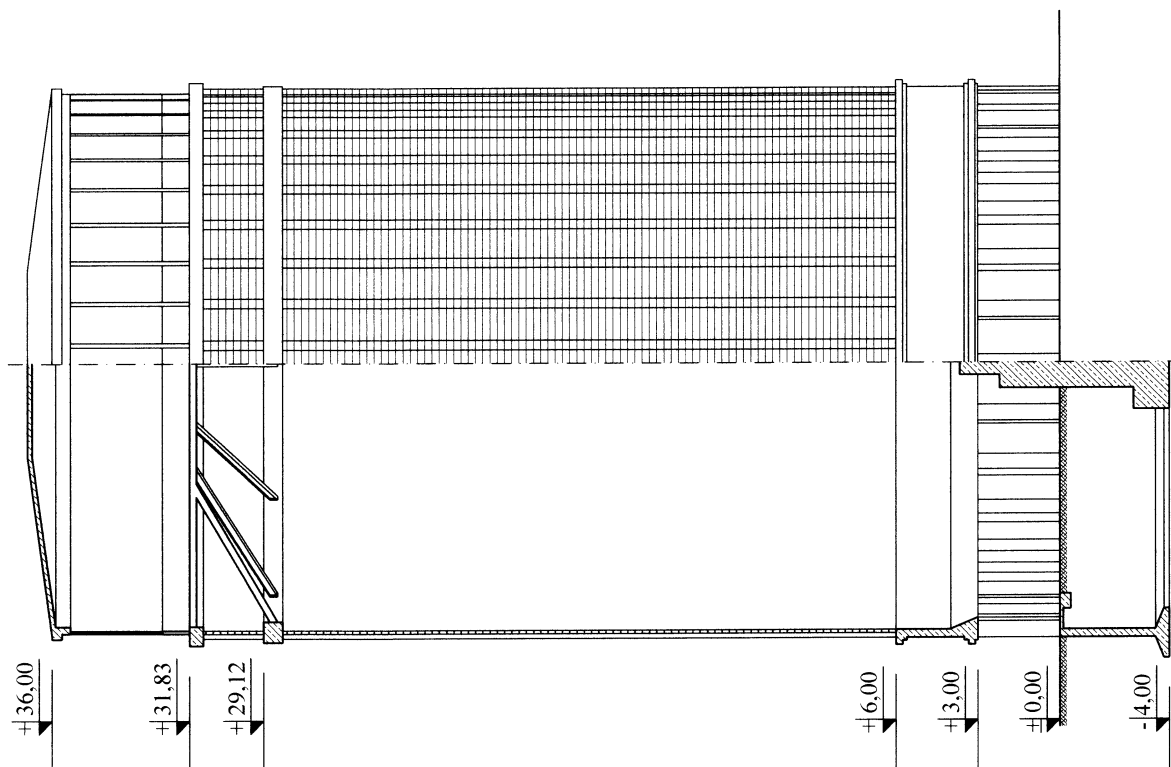
1. Wstęp

Wieże granulacyjne są ważnym węzłem w ciągu technologicznym produkcji nawozów azotowych. W istniejących zakładach występują tego typu obiekty o konstrukcji żelbetowej prefabrykowanej z elementów systemu Monnoyer, o konstrukcji szkieletowej z wypełnieniem murem z cegły ceramicznej, a w nowszych rozwiązaniach o konstrukcji żelbetowej powłoki walcowej, wznoszonej w deskowaniu ślizgowym.

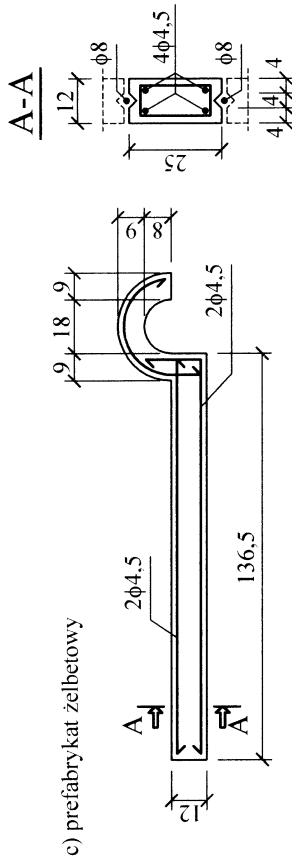
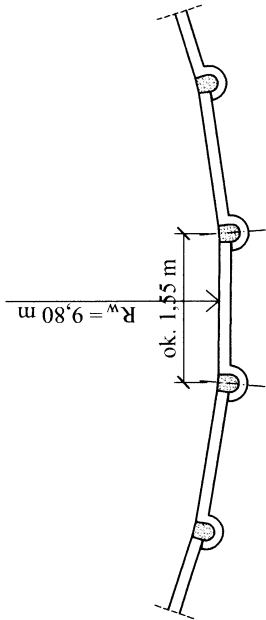
W referacie przedstawiono stan zagrożenia wieży granulacyjnej wykonanej z elementów systemu Monnoyer, w której po około pięćdziesięciu latach użytkowania wystąpiły uszkodzenia korozyjne stanowiące zagrożenie dla jej bezpieczeństwa. Zastosowane wzmocnienie i naprawy umożliwiły dalsze użytkowanie obiektu.

2. Opis konstrukcji obiektu

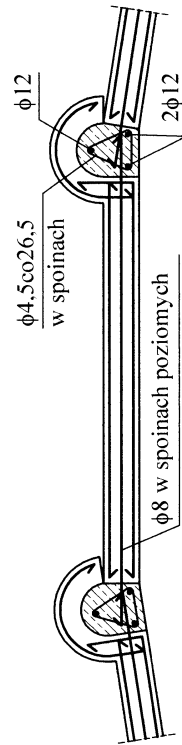
Wieża granulacyjna wzniesiona została w latach sześćdziesiątych poprzedniego stulecia.



b) fragment przekroju poprzecznego części prefabrykowanej



d) zbrojenie zamków i zbrojenie poziome



Rys. 1. Przekroje i szczegóły konstrukcyjne wieży granulacyjnej

Konstrukcja nośna wieży jest mieszana (Rys. 1). Podbudowa wieży, od poziomu fundamentów do poziomu +6,00 m, jest żelbetowa monolityczna. Zasadnicza część wieży między poziomami +6,00 i +32,00 m wykonana jest z żelbetowych elementów prefabrykowanych systemu Monnoyer, tworzących powłokę z uźebrowaniem pionowym [1]. Między poziomami +32,00 m i +36,00 m ustrój nośny stanowi konstrukcja stalowo-żelbetowa i murowa z cegły ceramicznej pełnej.

Prefabrykowana część wieży granulacyjnej wykonana jest z żelbetowych elementów systemu Monnoyer o wymiarach przekroju 12×25 cm i długości 1,55 m. Szczegóły zbrojenia prefabrykatów podano na rys. 1. W płaszczyźnie styku prefabrykatów zastosowano poziome pręty $\phi 8$ mm. Elementy prefabrykowane łączone są w zamkach żelbetowych, ukształtowanych w półkolistych wypustkach prefabrykatów. Wewnątrz zamków uformowano pionowe zbrojenie w postaci trzech prętów $\phi 12$ mm związanych trójkątnymi strzemionami $\phi 4,5$ mm. Zmonolityzowane zamki żelbetowe tworzą 40 słupków żelbetowych o rozstawie około 1,55 m, stanowiących pionowe uźebrowanie powłoki walcowej. Wewnętrzna powierzchnia wieży wyłożona jest cegłą kwasoodporną.

W poziomach +29,00 m i +32,00 m wykonano żelbetowe pierścienie monolityczne, na których oparta jest stalowa konstrukcja nośna typu kratowego stropu technologicznego wieży w poziomie +32,00 m. Zwieńczenie wieży stanowi konstrukcja żelbetowo – murowa, przekryta stropodachem żelbetowym o konstrukcji płytowo – żebrowej.

3. Opis uszkodzeń

Po upływie około 50 lat użytkowania obiektu wystąpiły zaawansowane uszkodzenia korozyjne elementów żelbetowych. Obejmowały one (Rys. 2 i 3):



Rys. 2. Charakterystyczne uszkodzenia korozyjne prefabrykowanej części wieży granulacyjnej



Rys. 3. Uszkodzona dolna monolityczna część powłoki wieży



Rys. 4. Rozległe uszkodzenia słupów podbudowy

- rozległe powierzchniowe i wgłębne uszkodzenia uźebrowanej powłoki oraz wieńców, lokalnie do około połowy grubości elementów powłoki (Rys. 2). W odsłoniętym zbrojeniu stwierdzono zaawansowaną korozję typu wżerowego, lokalnie została przerwana ciągłość zbrojenia. W obszarze koncentracji uszkodzeń prefabrykowanych elementów stwierdzono objawy lokalnych wyboczeń powłoki walcowej,
- rozległe uszkodzenia dolnej monolitycznej części powłoki w obszarze podbudowy wieży, poddanej już wcześniej naprawie przez obetonowanie. Zewnętrzna warstwa naprawcza została odspojona bądź całkowicie zniszczona (Rys. 3),
- słupy podbudowy, powierzchniowo zabezpieczone powłoką bitumiczną, doznały rozległych uszkodzeń, otulina zbrojenia została uszkodzona (Rys. 4).

Próbki betonu, pobrane z żeber powłoki walcowej oraz ze słupów podbudowy, charakteryzowały się bardzo silnym odalkalizowaniem (odczyn wyciągu wodnego pH wynosił 8,0÷9,0), podwyższoną zawartością jonów chlorkowych (około 0,33% masy spoiwa) oraz zawartością jonów siarczanowych w granicach normy (około 2,5% masy spoiwa).

4. Zastosowane wzmocnienia i naprawy

4.1 Dobór zakresu i technologii wzmocnień i napraw

Konstrukcja wieży, ze względu na zły stan techniczny, oraz objawy utraty stateczności w obszarze koncentracji uszkodzeń, wymagała wykonania wzmocnień oraz napraw.

Poszukiwano rozwiązań uzasadnionych ekonomicznie, które zapewniłyby bezpieczną pracę konstrukcji w wymaganym przez Użytkownika okresie pięciu lat. Możliwy technologicznie generalny remont wieży, polegający na odtworzeniu całej powłoki lub dobetonowaniu nowej warstwy betonu metodą torkretowania, został odrzucony zarówno z uwagi na koszt jak i z uwagi na zaawansowaną wglębną destrukcję korozyjną betonu.

Zastosowano następujące rozwiązanie:

- wzmocnienie monolitycznych wieńców żelbetowych i prefabrykowanej części powłoki wieży stalową konstrukcją przenoszącą obciążenia ze stropu technologicznego na monolityczną część podbudowy,
- naprawa uszkodzeń korozyjnych w obszarze wieńców żelbetowych, prefabrykowanej powłoki oraz konstrukcji podbudowy wieży.

4.2 Technologia napraw monolitycznych elementów wieży

Naprawy obejmowały wszystkie uszkodzone korozyjnie monolityczne żelbetowe elementy konstrukcyjne, tzn: słupy od poziomu $\pm 0,0\text{m}$ do $+2,5\text{m}$, ścianę od poziomu $+2,5\text{m}$ do $+6,5\text{m}$, zwieńczoną poziomym pierścieniem.

Zastosowane technologie naprawy elementów konstrukcji wieży zależały od sposobu i zaawansowania ich uszkodzenia. Słupy, w których stwierdzono jedynie lokalne odspojenia otuliny betonowej oraz zarysowania spowodowane korozją zbrojenia, zalecono naprawić przy zastosowaniu zaprawy modyfikowanej żywicą polimerową. Zalecono reprofilację otuliny zgodnie z wymaganiami technologii PCC.

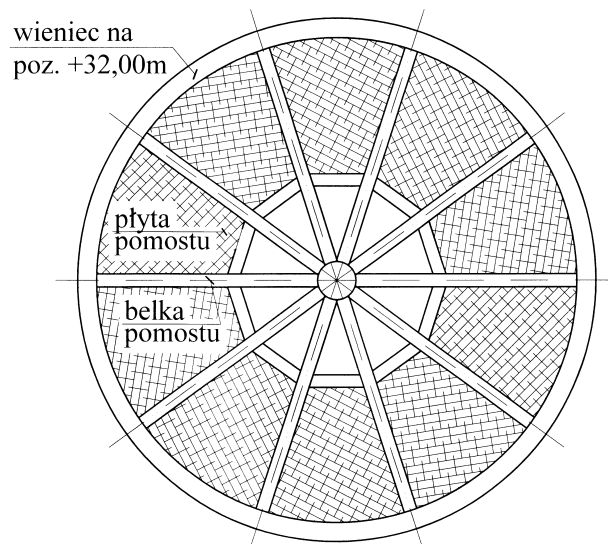
Słupy żelbetowe, w których ich zewnętrzna część została uszkodzona przez korozję na całym obwodzie na głębokości kilku centymetrów, zostały odtworzone przez dobetonowanie nowej, zbrojonej warstwy o grubości około 50mm, zespolonej z istniejącym słupem.

Uszkodzoną korozyjnie ścianę żelbetową w poziomie $+2,5\text{m}$ do $+6,5\text{m}$ o gr. 30cm, zrekonstruowano przez dobetonowanie od zewnętrznej strony nowej ścianki żelbetowej o gr. 15cm. Ściany zespolono ze sobą przez zastosowanie warstwy szepnej i zbrojenia „zszywającego”. W górnej części ściany (w poziomie $+6,8\text{m}$) wykształcono nowy wieniec żelbetowy spinający dolną część powłoki wykonanej z elementów prefabrykowanych. Zadaniem tego elementu było właściwe przekazanie obciążeń z konstrukcji wzmacniającej prefabrykowanej części wieży na konstrukcję jej podbudowy.

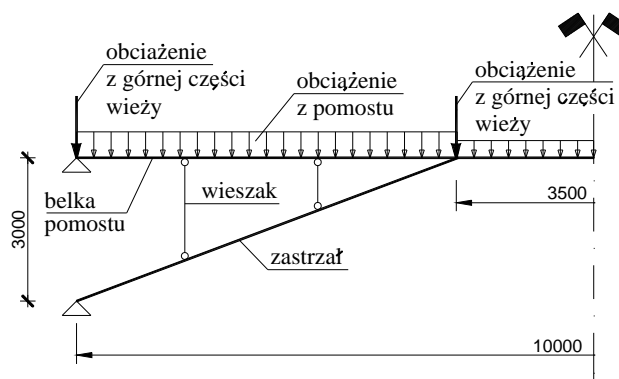
4.3 Wzmocnienie i naprawa prefabrykowanej części wieży

Ściana wieży, wykonana z elementów prefabrykowanych typu Monnoyer, pracuje przede wszystkim w płaskim stanie naprężenia, przy czym naprężenia spowodowane siłami pionowymi są decydujące. Z uwagi na masę konstrukcji, obciążenie prostopadłe do powłoki - związane z oddziaływaniem wiatru - jest pomijalnie małe. Przy istniejących uszkodzeniach powłoki wieży i jej uźbrowania oszacowano, że ściana nie jest w stanie bezpiecznie przejść oddziaływania związane z obciążeniami pionowymi przekazywanymi ze stropu technologicznego w poziomie $+32,00\text{ m}$. W tym celu zaprojektowano stalową konstrukcję przenoszącą wszystkie obciążenia pionowe z poziomu $+32,00\text{ m}$ do poziomu $+6,80\text{ m}$, z równoczesnym wzmocnieniem stalową konstrukcją uszkodzonych wieńców obwodowych w poziomach $+32,00\text{ m}$ i $+29,00\text{ m}$.

Konstrukcja stropu na poz. $+32,00\text{ m}$ składała się z dziesięciu, promieniście rozmieszczonych belek stalowych, podpartych zastrzałami. Na rys. 5 pokazano schematycznie rzut stropu, a na rys. 6 – schemat statyczny jednej z belek. Ustrój nośny stropu w poziomie $+32,00\text{ m}$ oraz konstrukcję wzmocnienia wieńców i powłoki walcowej odwzorowano modelem przestrzennym.



Rys. 5. Schemat stropu na poz. +32,00 m



Rys. 6. Schemat statyczny pojedynczej belki stropu na poz. +32,00 m

Generowane przez zastrzały siły rozporowe o wartości ok. 380 kN przeniesiono przez płaskowniki stalowe opasujące wieniec żelbetowy na poziomie +29,00 m. Ciągłość płaskownika na obwodzie uzyskano przez zastosowanie styków doczołowych łączonych śrubami klasy 8.8. Wypełnienie pomiędzy istniejącym wieńcem żelbetowym, a nową konstrukcją stalową wykonano z betonu droбноziarnistego, modyfikowanego żywicą polimerową.

Siły pionowe z wieńców w poziomie +32,00 m oraz +29,00 m przeniesiono na dolną, monolityczną część konstrukcji wieży (poz. +6,8 m), za pośrednictwem stalowych słupów wykonanych z dwuteowników walcowanych HEA 160. Słupy usytuowano w taki sposób, by siły z belek i zastrzałów stropu przekazywane były na nie bezpośrednio. W celu zmniejszenia długości wybozeniowych słupów, zaprojektowanych ze stosunkowo smukłych elementów, zamocowano je co ok. 3,2 m do powłoki wieży oraz dodatkowo połączono między sobą za pomocą odcinków prętów $\phi 20$ mm pracujących jako ściągi. Wszystkie elementy stalowe zabezpieczono antykorozyjnie powłokami lakierniczymi, odpowiednimi do stwierdzonej korozyjności atmosfery.

Widok wzmocnionej i naprawionej prefabrykowanej części wieży granulacyjnej pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Widok wykonanego wzmocnienia

5. Stan zachowania wzmocnionej wieży po czterech latach użytkowania

Powtórne badanie wieży granulacyjnej, po upływie około 4 lat od wykonania wzmocnienia i napraw opisanych w punkcie 4, wykazały:

- dobry stan zachowania stalowej konstrukcji wzmocnienia wieży (Rys. 8),
- w ogólności dobry stan zachowania wieńców obwodowych wzmocnionych pierścieniem stalowym i poddanych rekonstrukcji (Rys. 8),



Rys. 8. Dobry stan stalowej konstrukcji wzmacniającej, uszkodzenia korozyjne elementów żelbetowych

- nowe uszkodzenia, zwłaszcza w uźebrowaniu powłoki walcowej wieży, które powstały po wykonaniu napraw, w miejscach uprzednio dobrze zachowanych (Rys. 9). Powstanie nowych uszkodzeń świadczy o znacznej utracie trwałości prefabrykowanych elementów żelbetowych konstrukcji wieży.



Rys. 9. Uszkodzenia uźebrowania prefabrykowanej powłoki walcowej

Analogicznie jak przed wzmocnieniem i naprawą powłoki stwierdzono większą koncentrację uszkodzeń korozyjnych od strony sąsiedniego obiektu z kominami wydmuchu powietrza z suszarek stosowanych przy produkcji nawozów. W wydmuchiwanym powietrzu stwierdzono zawartość cząstek azotanu amonowego NH_4NO_3 , emitowanego w ilości około 3 kg/godzinę.

Z uwagi na konieczność zapewnienia dalszego użytkowania wieży granulacyjnej w ograniczonym okresie pięciu lat zalecono naprawę wglębnie uszkodzonych żeber powłoki walcowej. Dobry stan zachowania stalowych elementów konstrukcji wzmocnienia prefabrykowanej powłoki walcowej zapewnia bezpieczne przenoszenie obciążeń ze stropu technologicznego w poziomie +32,00 m na konstrukcję podbudowy wieży.

5. Podsumowanie

Zastosowane naprawy i wzmocnienia uszkodzonej wskutek korozji konstrukcji wieży granulacyjnej umożliwiły dalszą bezpieczną eksploatację obiektu, a tym samym zachowanie ciągłości procesu produkcji nawozów azotowych.

Wzmocnienie prefabrykowanej części wieży konstrukcją stalową przejmującą obciążenia pionowe, w kontekście powstawania nowych uszkodzeń w miejscach uprzednio dobrze zachowanych, okazało się racjonalnym rozwiązaniem. Co więcej, umożliwiło eksploatację obiektu w okresie dłuższym niż wcześniej przewidywano, do czasu wdrożenia nowej technologii produkcji nawozów.

Przy zaawansowanych wglębnych uszkodzeniach korozyjnych struktury betonu skuteczność naprawy przez obetonowanie jest ograniczona. Właściwym rozwiązaniem w takich przypadkach jest całkowite odtworzenie uszkodzonego elementu konstrukcyjnego.

Literatura

1. Seria Budownictwo betonowe, Tom XII, Budowle Przemysłowe, Część II, Arkady, 1971.