

# Diagnostyka, wzmocnianie i monitorowanie żelbetowych i sprężonych zbiorników na materiały sypkie i ciecze

Prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz, dr hab. inż. Paweł Lewiński,  
Instytut Techniki Budowlanej

## 1. Charakterystyka rozpatrywanych konstrukcji

Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, eksploatowane od ponad 50. lat [2], z powodu ich nieodpowiedniego stanu technicznego często poddawano badaniom *in situ*. Z przeprowadzonych badań i analiz wynika, że podstawową przyczyną takiego stanu był brak właściwego zabezpieczenia konstrukcji tych obiektów przed korozją, przy czym uszkodzenia tym spowodowane powstawały wskutek błędów, jakie występowały na etapie projektowania, wykonywania jak i eksploatacji zbiorników. Zagadnienia te były przedmiotem wielu publikacji, w tym większości politechnik (np. [1, 2]) oraz Instytutu Techniki Budowlanej [3-9]. Monitorowanie obiektów budowlanych, zarówno w postaci pomiarów *in situ*, jak i bezprzewodowe, jest od szeregu lat przedmiotem prac m.in. ITB [10]. Ochrona antykorozyjna zbrojenia była niewystarczająca we wszystkich badanych przypadkach, a uszkodzenia tego rodzaju wpływały na zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji.

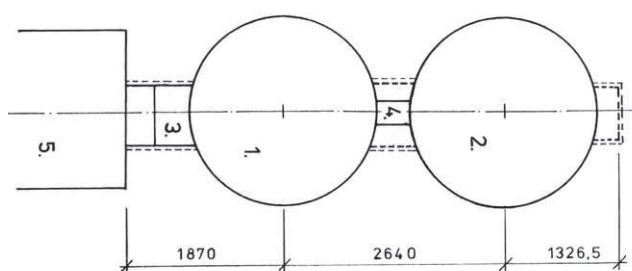
## 2. Występujące zagrożenia konstrukcji

### 2.1. Rodzaje zagrożeń

Poszczególne rodzaje zagrożeń zbiorników przedstawione zostaną na przykładach reprezentatywnych dla poszczególnych typów takich konstrukcji. W przeszłości po katastrofie silosu na cement dokonano badań i oceny ponad 200 silosów tego typu. W większości silosów stwierdzono głównie niedostateczną jakość betonu i zbrojenia, zalecając ich wzmocnienie.

### 2.2. Przykłady zagrożeń konstrukcji silosów

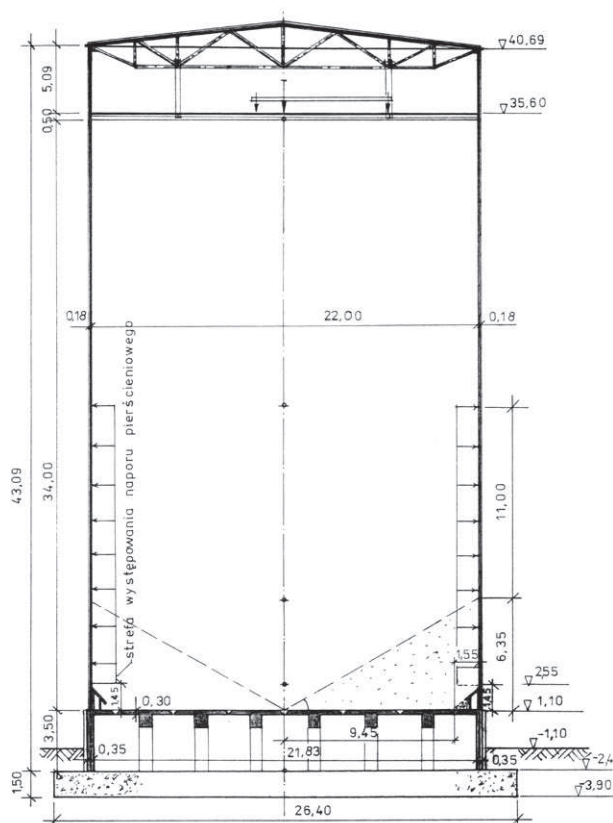
**Przykład 1.** Omawiane w tym przykładzie silosy struno-betonowe do przechowywania cukru wykonano w połowie lat sześćdziesiątych jako żelbetowe monolityczne, sprężone przez nawijanie za pomocą nawijarki karuzelowej typu „Pająk” [2]. Stanowiły one baterię 2 bliźniaczych silosów (nr 1 i nr 2) o wysokości 41,8 m i o średnicy wewnętrznej 22 m. Silosy nad komorą silosową na poziomie + 36,7 m połączone zostały łącznikiem



**Rys. 1.** Rzut baterii silosów na cukier. Oznaczenia: 1., 2. – silosy nr 1 i nr 2, 3 – wieża operacyjna elewatora, 4. – pomieszczenie klimatyzatorni i przejście nad silosami, 5 – pakownia

o konstrukcji stalowej i korytarzem w części podziemnej. Między komorami, nad szczeliną dylatacyjną płyt fundamentowych, znajduje się pomieszczenie klimatyzatorni (por. rys. 1 i rys. 2).

Do awarii strun sprężających doszło w styczniu 1995 r. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono zerwanie czterech strun sprężających powłokę silosu nr 1 i dwóch strun sprężających powłokę silosu nr 2. Zerwanie strun miało miejsce pod stropem pomieszczenia klimatyzatorni, ponieważ styk daszku tego pomieszczenia ze ścianami silosów nie był szczelny i doszło do zamakania tego miejsca przez wody opadowe. Torkret pokrywający struny uległ odspojeniu wskutek ich sprężynowania w chwili zerwania. Na zerwanych strunach stwierdzono głębokie wżery korozyjne, ciągnące się na znacznej długości. W wyższych partiach silosu nr 1 stwierdzono jeszcze kilka pojedynczych strun bez naciągu. Podczas badań stwierdzono, że zamiast projektowanego torkretu o wytrzymałości na ściskanie 20 MPa zastosowano zwykły tynk cementowo-wapienny. W wyniku badań stwierdzono, że rzeczywisty rozstaw strun znacznie różni się od założonego w projekcie, przy czym największe różnice występują u dołu komory, tam gdzie przekroje są najbardziej wyężone i występuje największe zagęszczenie strun. W niektórych strefach różnice te dochodziły do ponad 40%. W silosie



Rys. 2. Przekrój pionowy silosu na cukier

nr 2 zaobserwowano znaczne obniżenie średnic strun (do  $\varnothing$  4,7 mm) w stosunku do wartości nominalnej ( $\varnothing$  5 mm). W nadkomorowej i podkomorowej części silosów stwierdzono szereg rys pionowych o szerokości rozwarcia do 1 mm, których jednak dalsza propagacja ulegała zatrzymaniu. Pomimo że silos nr 1 posadowiony jest na wspólnym fundamencie i połączony z wieżą operacyjną, różnica obciążeń i osiadań obu części składowych konstrukcji spowodowała, że wzdłuż styku obu konstrukcji wystąpiły liczne pęknięcia i doszło do uszkodzenia wieży oraz torkretu na ścianie silosu w miejscach połączeń.

**Przykład 2.** Przykład ten dotyczy silosu częściowo sprężonego do magazynowania klinkieru znajdującego się na terenie kombinatu cementowo-wapienniczego. Silos wykonano w 1998 r. Zbiornik ma wysokość 27 m do górnego poziomu wieńca pierścieniowej ściany i 42,5 m do poziomu stropu nad kopułą stożkową oraz średnicę wewnętrzną 50,0 m. Widok silosu przedstawia rysunek 3. Ściany płaszcz zewnętrzny zaprojektowano jako żelbetowe monolityczne z betonu klasy B40, częściowo sprężone kablami, o grubości 40 cm i o wysokości 27 m. Płaszcz zewnętrzny wykonano w deskowaniach ślizgowych, a następnie sprężono dwójakiego rodzaju kablami składającymi się z 7 oraz 12 splotów  $\varnothing$  5 mm o wytrzymałości na rozciąganie 1770 MPa. Usytuowanie układu krzyżowego kotwienia kabli sprężających

przewidziano w lizenach (pilastrach) o szerokości 3,9 m wysuniętych ze ścian na 40 cm, przy zastosowaniu bloków kotwiących typu BBV. Każdy kabel przebiega przez 3 pilastry, w skrajnych jest zakotwiony. Zabezpieczenie cięgien sprężających po sprężeniu zaprojektowano w postaci iniekcji przez bloki kotwiące usytuowane w pilastrach. Przeprowadzone obserwacje stanu powierzchni zewnętrznej silosu wykazały, że powierzchnia ściany żelbetowej u dołu wykazuje zarysowania i objawy rozszczelnienia, a w otoczeniu bramy wjazdowej usytuowanej w osi lizeny nr 4 – objawy jej odspojenia od płaszczyzny ściany, m.in. wskutek nierównomiernych osiadań podłoża. Sprzyja to penetracji do wewnątrz ściany i znajdujących się pod jej powierzchnią zakotwień kabli sprężających – zarówno wód opadowych jak też i agresywnych związków występujących w gazach poprodukcyjnych. Nastąpiło też pęknięcie plomb gipsowych w tej samej strefie (między lizenami nr 3 i nr 4), wcześniej nałożonych na zewnętrznych ścianach silosu.



Rys. 3. Widok silosu klinkieru

Rysy pionowe i poziome o szerokości 0,3 mm wystąpiły tuż nad strefą styku żelbetowej monolitycznej ławy pierścieniowej z konstrukcją ścian silosu po obu stronach lizeny nr 3. Wskazywało to, jak wynikało z przeprowadzonej analizy obliczeniowej, na termiczno-skurczowy charakter tych zarysowań ściany. W czasie prowadzonych badań i obserwacji następowała stabilizacja rys. Z analizy dokumentacji technicznej obiektu wynikało, że zbrojenie płaszcz silosu podane na rysunkach konstrukcyjnych miało znacznie mniejszy przekrój poprzeczny (o ok. 30%) niż wynikający z obliczeń projektowych. Prowadziło to więc do istotnego obniżenia nośności ścian silosu w przekrojach pionowych. W tej sytuacji konieczne było zalecenie kilkuprocentowego obniżenia poziomu składowania materiału w silosie przy założeniu ewentualnego stopniowego podwyższania poziomu zasypywania silosu po okresie próbnych obciążeń. W przypadku zbrojenia płaszcz zgodnie z obliczeniami statycznymi nie byłyby konieczne (jak wynika z obliczeń sprawdzających) jakiegokolwiek ograniczenia w zakresie użytkowania silosu.

### 2.3. Przykłady zagrożeń konstrukcji zbiorników

**Przykład 3.** Osadnik wstępny, będący jednym z obiektów oczyszczalni ścieków, stanowi zblokowany zespół żelbetowych komór, kanałów i pomieszczeń funkcyjnych o wymiarze w planie 57,015 × 31,01 m i zmiennej wysokości 7,93-11,74 m. Obiekt osadnika, który został wykonany w latach 1998-2005, składa się z połączonych konstrukcyjnie elementów ściennych, koryt, kanałów i płyty dennej, przykrytych stropami lub pokrywami typu lekkiego. Zespół komór zgarniaczy osadnika wstępnego składa się z 3 komór konstrukcyjnie połączonych z pozostałą częścią żelbetowej konstrukcji obiektu, przy czym komory A i B są częściowo zblokowane, mając wspólną zewnętrzną ścianę podłużną, zaś ściany poprzeczne są oddzielne. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz inwentaryzacji uszkodzeń wykonanych przez ITB można było stwierdzić, że przekroczona została dopuszczalna szerokość rozwarcia rys, dla której zachowana jest szczelność konstrukcji. Badania obiektu wykazały, że stan graniczny szerokości rozwarcia rys nie był spełniony i ścieki przenikały przez rysy. Szczelność konstrukcji w miejscach rys i przerw roboczych była niedostateczna, a zbrojenie z uwagi na znaczną szerokość rozwarcia rys (0,5 mm) mogło osiągnąć granicę plastyczności i rozpoczął się proces jego korozji.

Stwierdzono również uszkodzenia powłoki izolacyjnej ścian (złuszczenia), prowadzące do osłabienia betonu. Inwentaryzację uszkodzeń komór zgarniacza osadnika wstępnego dokonaną w 2008 r. przedstawiono na rzucie zbiornika wielokomorowego na rys. 5. W wyniku realizacji zaleceń ekspertyzy ITB z 2008 r. komory zgarniacza osadnika wstępnego: A, B i C sprężono kablami. Ponowne badania osadnika wstępnego przeprowadzone przez ITB w 2011 r., tj. po wzmocnieniu komór zgarniaczy poprzez sprężenie kablami, miały już charakter kompleksowy i obejmowały prawie wszystkie komory, kanały i inne pomieszczenia obiektu osadnika. Dokonano też obliczeń konstrukcji osadników wstępnych jako całości metodą elementów skończonych za pomocą programu komputerowego ARSA 2011 w oparciu o dokumentację. Obliczenia sprawdzające konstrukcji osadnika wstępnego – dzięki realizacji zaleceń ekspertyzy ITB z 2008 r., obejmujących m.in. sprężenie ścian komór zgarniaczy – nie wykazały przekroczeń nośności przekrojów żelbetowych komór i kanałów żelbetowych. Nie miało to natomiast żadnego negatywnego wpływu na pozostałe komory i kanały, w których niedobór zbrojenia był znacznie mniejszy, niż w przypadku komór zgarniaczy. Natomiast z tych samych obliczeń wynikało, że skurcz betonu mógł być przyczyną powstania szeregu rys, przy czym nie zastosowano zbrojenia przeciwskurczowego.

### 2.4. Przyczyny zagrożeń konstrukcji silosów i zbiorników

Nowo wprowadzone europejskie przepisy normowe nie zostały jeszcze w pełni wdrożone do praktyki,

co powoduje, że podczas badań prowadzonych *in situ* nadal napotyka się typowe nieprawidłowości projektowe i wykonawcze dotyczące omawianego typu konstrukcji. Typowe uszkodzenia wywołane są najczęściej przez tego rodzaju obciążenia, które nie są uwzględniane ani na etapie projektowania ani też wykonawstwa, a należą do nich głównie oddziaływania wymuszone, to znaczy oddziaływania temperaturowo-skurczowe o różnej genezie [4], a także wzajemne oddziaływania pomiędzy konstrukcją i podłożem gruntowym, niewłaściwie oszacowane na etapie projektu budowlanego, a później już pozostawione bez zmian (por. [1], [3], [5]). Takie nieprawidłowości pojawiają się nawet w przypadku zbiorników wykonanych z betonu dobrego jakościowo (przykłady 2 i 3). Wpływ tych oddziaływań można ograniczać zarówno wprowadzając odpowiednie zalecenia projektowe, warunki techniczne wykonania, odbioru i eksploatacji [8], jak też stosując technologiczne i projektowe metody ograniczenia wpływu ciepła hydratacji i efektów wilgotnościowych, a także oddziaływań termicznych. Innego rodzaju konstrukcjami, w przypadku których można napotkać typowe uszkodzenia, są zbiorniki i silosy sprężane obwodowo. Silosy z betonu sprężonego eksploatowane są w kraju od ponad pięćdziesięciu lat [2] i wiele z nich jeszcze niedawno znajdowało w stanie awaryjnym, lecz, jeżeli nie wyłączone ich z eksploatacji, zostały poddane procesowi naprawczemu połączonemu z monitoringiem. Stany zagrożeń konstrukcji silosów sprężonych obwodowo spowodowane korozją cięgien, tak w przypadku sprężenia kablami jak i strunami, występują (lub występowały) zarówno wówczas, gdy powłoka żelbetowa jest prefabrykowana jak i monolityczna, choć w pierwszym przypadku zagrożenia są (lub były) znacznie większe. Obecnie dysponujemy już metodami skutecznego i trwałego wzmocnienia tego typu konstrukcji. Okazuje się jednak, że uszkodzenia konstrukcji zbiorników na materiały sypanie pojawiają się również w przypadku konstrukcji sprężonych wznoszonych przy zastosowaniu nowych technologii. Podstawową przyczyną złego stanu technicznego silosów sprężonych, jak już wspomniano, jest brak właściwego zabezpieczenia przed korozją konstrukcji tych obiektów, a zwłaszcza ich zbrojenia sprężającego. Lokalna korozja wżerowa może spowodować dyskwalifikację zbrojenia na całym obwodzie, gdyż charakter pracy tego typu cięgien sprężających wymaga ich ciągłości. Już same oddziaływania termiczne i wilgotnościowe stanowią zagrożenie korozyjne dla zbrojenia, tym bardziej w przypadku środowiska chemicznie agresywnego dochodzi często do awarii.

## 3. Diagnostyka i wzmocnienia

### 3.1. Badania diagnostyczne i ocena zagrożeń

Usuwanie zagrożeń w przypadku silosów z betonu sprężonego wymaga wcześniejszego ich zdiagnozowania na podstawie odpowiednich badań i analiz,

z uwzględnieniem badań *in situ* i laboratoryjnych konstrukcji i podłoża, tworzących podstawę dla analizy statyczno-wytrzymałościowej, uwzględniającej aktualny stan zbrojenia sprężającego i zwykłego, betonu, izolacji termicznej (o ile istnieje), rzeczywistą geometrię i wszelkie możliwe obciążenia. Konieczne jest, aby przy ocenie torkretu dokonać szczegółowego zbadania powłoki na całej jej powierzchni, zinwentaryzować rysy i miejsca wydające głuchy odgłos przy ostukiwaniu. Na tej podstawie można dopiero wybrać miejsca do badań zbrojenia sprężającego w odkrywkach, gdyż w otoczeniu rys o dużej szerokości rozwarcia można spodziewać się wystąpienia korozji wżerowej. Korozja żelbetu w częściach niesprężonych silosów jest zwykle dobrze widoczna. Płaszcz silosu w miejscach odspojenia się torkretu ma inną izolacyjność termiczną, toteż lokalizację tego rodzaju uszkodzeń można określać za pomocą badań termowizyjnych. W diagnostyce omawianych obiektów stosowane są różne metody nieniszczące, takie jak: sklerometryczne, akustyczne (pomiar fal), radiologiczne i seminiszczące (metoda pull-out).

Ocena statyczno-wytrzymałościowa może dotyczyć norm obciążeń, które obowiązywały wtedy, gdy projektowane były zbiorniki opisane w przedstawionych przykładach, ale z uwzględnieniem obecnego stanu wiedzy, np. poprzez uwzględnienie tych oddziaływań, które wymagane są w obecnych przepisach normowych, z tym że silosy wykonywane we wcześniejszych okresach często nie spełniają obecnych wymagań. Niekiedy w stosunku do obiektów bezpiecznie eksploatowanych od wielu lat, posługując się archiwalnymi danymi eksploatacyjnymi, można indywidualnie dopuścić pewne obniżenie poziomu bezpieczeństwa.

### 3.2. Wzmocnienia konstrukcyjne

Można wymienić cały szereg sposobów wzmocnienia żelbetowych i sprężonych zbiorników na materiały sypkie i cieczce. Zespoły wielu krajowych politechnik: krakowskiej, wrocławskiej, warszawskiej, a także ITB oraz firmy projektowo-wykonawcze, jak np. „Chemadex” specjalizują się w tych zagadnieniach. Sposób wzmocnienia silosu lub zbiornika związany jest z geometrią i stanem technicznym konstrukcji, zakresem i charakterem jej wad i uszkodzeń oraz stopniem agresywności środowiska.

W przypadku awarii baterii silosów opisanej w przykładzie 1 zalecenia dotyczące naprawy ściany cylindrycznej zasadniczo obejmowały odtworzenie stanu pierwotnego uzwojenia sprężającego płaszcz w zakresie możliwym do wykonania oraz wzmocnienie i silosów nr 1 i nr 2 poprzez sprężenie, przy przyjęciu dla obu silosów jednakowej liczby cięgien i doprowadzeniu ich do poziomu stropu nad komorą. W 1995 r., z uwagi na pojawienie się na naszym rynku nowych technologii, wydano opinię, że wzmocnienie obu silosów można przeprowadzić przez zewnętrzne sprężenie kablami w osłonkach z tworzywa sztucznego i zabezpieczonych



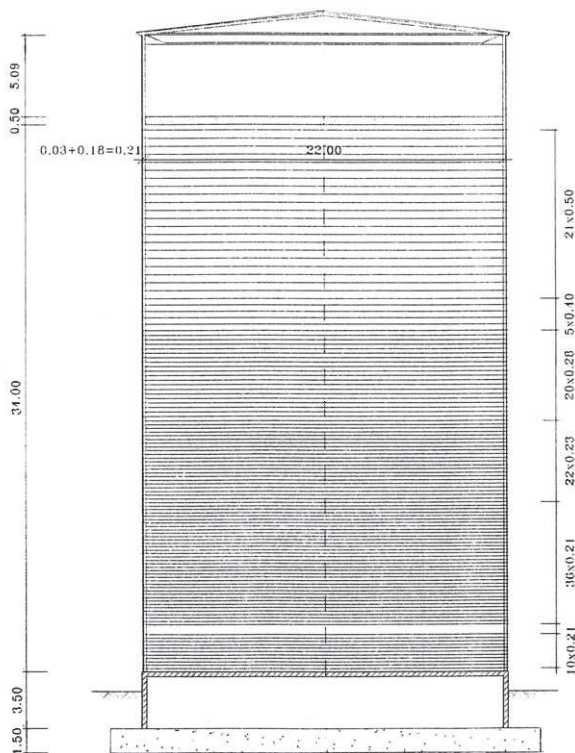
**Rys. 4.** Sprężanie płaszcz silosu kablami Freyssineta z zastosowaniem zakotwienia krzyżowego typu X

smarem (za pomocą niskotarciowego systemu sprężania – NSS). Niskotarciowy system sprężania jest efektywniejszy od tradycyjnego z uwagi na obniżenie strat od tarcia na krzywiznie powłoki z 2/3 maksymalnej siły naciągu kabla do 18-19% tej wielkości, przy równocześnie zwiększonej odporności korozyjnej. Istotną sprawą jest też możliwość wyeliminowania pilastrów do kotwienia kabli poprzez zastosowanie zakotwienia krzyżowego typu X (por. rys. 4), dzięki czemu wykonuje się tylko jedno zakotwienie na obwodzie, co zapewnia łatwość i krótki czas montażu przy zachowaniu efektywnej kontroli naciągu kabli. Ważne było także, aby przy wzmocnianiu cienkich powłok żelbetowych, wcześniej sprężonych strunami i słabo zbrojonych zbrojeniem zwykłym, nie wprowadzać dodatkowego zginania od pilastrów w kierunku równoleżnikowym, na jakie powłoka nie była obliczona. W systemie NSS kable sprężające typu Freyssineta zabezpieczone są przez obudowę z tworzywa sztucznego (HDPE) i smar. Sploty używane do sprężania składają się z centralnego prostoliniowego drutu oraz sześciu obwodowych drutów spiralnych. Kompletny ściąg wykonywany jest w wytwórni. Dodatkowym zabezpieczeniem jest zewnętrzna rura z tworzywa sztucznego wypełniona zaprawą cementową. Rura ta zabezpiecza też osłonki kabli przed uszkodzeniami mechanicznymi i zmniejsza docisk do powierzchni płaszczu. Zalecenia omawianej ekspertyzy ITB zostały zrealizowane, przy czym była to pierwsza w Polsce realizacja wzmocnienia konstrukcji powłoki silosu metodą NSS. W projekcie wzmocnienia przyjęto zastosowanie kabli

sprężających typu Freyssineta o symbolu T15S, o powierzchni przekroju stali sprężającej  $150 \text{ mm}^2$  i o sile zrywającej  $279 \text{ kN}$ . Kable ułożono na całej wysokości komory silosu w zmiennym rozstawie (por. rys. 5), przy czym zaszła konieczność przeciągnięcia kabli przez otwory wykonane w ścianach wieży operacyjnej. Kable sprężono hydraulicznie. Siła naciągu kabli po stratach wyniosła  $164 \text{ kN} > 160 \text{ kN}$  (wielkości założonej w projekcie wzmocnienia).

Ocieplenie przyjęto z wełny mineralnej o grubości  $10 \text{ cm}$ , a obudowę ocieplenia z blachy trapezowej powlekaną tworzywem. System NSS od 1995 r. przeżył pewną ewolucję, ale zasadnicze idee nie uległy zmianie i ten rodzaj wzmocnienia okazał się efektywny.

W przypadku zarysowanego i nieszczelnego zbiornika wielokomorowego opisanego w przykładzie 3 zalecenia ekspertyzy ITB z 2008 r. dotyczące naprawy ścian komór zgarniacza osadnika wstępnego: A, B i C obejmowały sprężenie kablami każdej komory oddzielnie. Sprężenie zrealizowano za pomocą kabli bezprzewodnościowych jednosplotowych o niskiej relaksacji



**Rys. 5.** Przekrój pionowy komory wzmocnionego silosu na cukier i sposób wzmocnienia

systemu BBR w osłonkach HDPE wypełnionych smarem (por. rys. 6). Zastosowano kable o wytrzymałości na rozciąganie (podobnie jak w poprzednim przypadku)  $1860 \text{ MPa}$ . Kable zostały zakotwione w stalowych blokach kotwiących umiejscowionych w narożach komór A, B i C osadnika wstępnego. Na niektórych odcinkach zastosowano ponadto dewiatory kierunkowe celem eliminacji nadmiernych naprężeń rozciągających

na powierzchniach zewnętrznych. Poszczególne ściany sprężono 30 lub 36 kablami.

Sposoby wzmocnień zmieniały się wraz z rozwojem techniki. Kierunek rozwoju polega na podnoszeniu efektywności i trwałości przy równoczesnym obniżaniu ciężaru wzmocnienia.

#### 4. Monitorowanie konstrukcji po wzmocnieniu

##### 4.1. Monitorowanie systemów sprężenia

Po realizacji zaleceń ekspertyzy dotyczącej baterii silosów na cukier (przykład 1) podjęto prace dotyczące monitorowania systemu sprężenia. Fragmenty kabli sprężających typu Freyssineta pozostawiono celowo bez zabezpieczeń tak, aby umożliwić monitoring zakotwienia kabli sprężających i pomiary poślizgów cięgien (por. rys. 6).

Po wykonaniu sprężenia zbiornika wielokomorowego, opisanego w przykładzie 3, za pomocą kabli bezprzewodnościowych systemu BBR w osłonkach wypełnionych smarem prowadzono monitoring wzmocnień, kontrolując stan cięgien i zabezpieczeń bloków kotwiących



**Rys. 6.** Monitorowanie systemu sprężenia wzmocnionego silosu na cukier i pomiary poślizgów cięgien

oraz naciąg cięgien poniżej i powyżej poziomu ścieków po 2 i 3 latach od wykonania ekspertyzy. Stan wszystkich kabli i bloków kotwiących po dokonanych kontrolach oceniono pozytywnie (rys. 7).

##### 4.2. Monitorowanie przemieszczeń pionowych

W ramach ekspertyzy silosu na klinkier (przykład 2) zlecono wykonanie dokumentacji geodezyjnej obejmującej



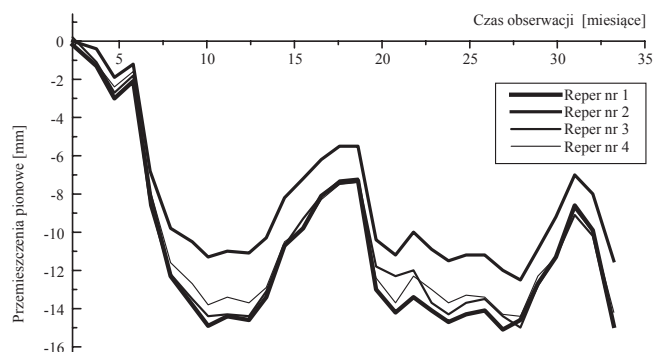
**Rys. 7.** Sposób wzmocnienia ścian żelbetowych komór zgarniaczy osadnika wstępnego

badania osiadań. W celu prowadzenia pomiarów osiadań silosu zainstalowano 9 reperów. Pomiar wyjściowy wykonano w 1998 r., a następnie wykonano 25 kolejnych pomiarów, których wyniki przeanalizowano w ramach ekspertyzy ITB z 2001 r. Wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych ściany żelbetowej silosu magazynowego klinkieru, wykonanych od 2002 r. do 2003 r., zawierała kolejna dokumentacja geodezyjna. W okresie październik 2002-czerwiec 2003 przeprowadzono 6 kolejnych pomiarów przemieszczeń pionowych reperów za pomocą niwelacji precyzyjnej w odstępach czasowych wynoszących około 40 dni. Przebiegi przemieszczeń pionowych reperów nr 1, 2, 3 i 4, osadzonych w ścianach betonowych silosu, w okresie pierwszych lat od zakończenia budowy, zostały ukazane w funkcji czasu na rysunku 8.

Przebieg obciążenia silosu na tle przemieszczeń pionowych ścian silosu od dnia 2002 r. do 2003 r. na tle wielkości napełnienia silosu związanej z wysokością napełnienia pokazano na rys. 9 (wysokości napełnienia podane na rysunku dotyczą jedynie dni wykonania pomiarów przemieszczeń). Powyższy przebieg obciążenia znajduje odzwierciedlenie w przemieszczeniach pionowych poszczególnych reperów.

Analiza uzyskanych danych dotyczących osiadania pozwala stwierdzić, że najmniejsze osiadania ścian zbiornika, rzędu 5,5-7,5 mm, powstały przy najmniejszym zapełnieniu zbiornika od chwili rozpoczęcia jego

eksploatacji, tj. przy zapełnieniu rzędu 16,5 Gg. Natomiast największe osiadania ścian zbiornika od chwili rozpoczęcia jego eksploatacji, rzędu 11,3-14,9 mm, powstały przy największym zapełnieniu zbiornika w tym okresie czasu, tj. przy zapełnieniu rzędu 66,0 Gg. Stwierdzono, że osiadania ścian zbiornika występujące przy jego odciążeniu do poziomu 16,5 Gg (tj. do 25% maksymalnej wartości wcześniejszego zapełnienia) stanowiły ok. 50% wartości osiadań powstałych przy obciążeniu maksymalnym, a zatem można ocenić, że pozostałe 50% wielkości przemieszczeń pionowych ma charakter osiadania sprężystego. Z porównania wykresów kolejnych faz przemieszczeń pionowych reperów osadzonych w ścianach żelbetowych silosu (rys. 8) wynika, że osiadania te przebiegają prawie równolegle. Ponadto wartości osiadań po osiągnięciu pewnej granicznej wartości, rzędu 15 mm, nie mają tendencji narastającej. Z przeprowadzonych badań wynika, że według pomiarów przemieszczenia pionowe wykazują trwałą tenden-



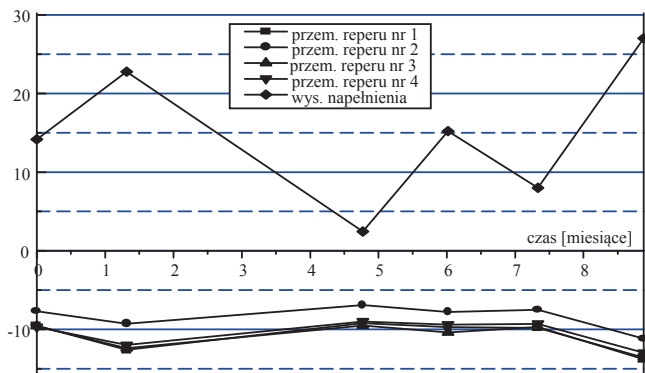
**Rys. 8.** Przebieg osiadań ścian silosu w okresie pierwszych lat od zakończenia budowy

cję do stabilizacji mimo upływu zaledwie 2 lat od wykonania ścian zbiornika.

Przebieg odpowiedzi układu konstrukcja silosu-ściany szczelinowe-podłoże gruntowe w postaci przemieszczeń pionowych ścian silosu na wymuszenie w postaci obciążenia silosu, pokazany na rysunku 9, potwierdza w znacznym stopniu odwracalny charakter przemieszczeń pionowych poszczególnych reperów. Te wielkości osiadań są mniejsze od globalnych dopuszczalnych osiadań wg normy, toteż w najbliższym okresie czasu nie będą miały one wpływu na nośność i rysoodporność omawianej konstrukcji.

W ramach ekspertyzy osadnika wstępnego (przykład 3) monitorowano również wpływ podłoża gruntowego na konstrukcję zbiornika wielokomorowego. Badania geotechniczne podłoża przeprowadził Instytut Techniki Budowlanej. Przemieszczenia pionowe obiektu zostały określone w ramach cyklu pomiarów geodezyjnych. Jak wynikało z przeprowadzonych badań, proces przemieszczeń pionowych osadnika wstępnego do chwili zakończenia ekspertyzy nie uległ pełnej stabilizacji, ale wielkości przemieszczeń pionowych

pomierzone do końca 2010 r. nie przekraczały wartości 5,5 mm. Wartość maksymalnych przemieszczeń pionowych okazała się mniejsza od dopuszczalnej, która tu wynosiła 70 mm, a zatem stan graniczny przemieszczeń był spełniony. Zbliżone wartości uzyskano w wyniku obliczeń MES. Z badań geotechnicznych wynika, że po przeprowadzeniu lokalnej wymiany gruntu wraz z zagęszczaniem, uzyskano dobre podłoże do posadowienia obiektu osadnika wstępnego.



**Rys. 9.** Przebieg przemieszczeń pionowych ścian silosu od dnia 3.10.02 r. do 30.06.03 r. na tle wielkości napełnienia silosu związanej z wysokością napełnienia

#### 4.3. Monitoring zmian uszkodzeń konstrukcji i szerokości rozwarcia rys

Monitorowaniu poddano tunele transportowe oraz płaszcz silosu opisanego w przykładzie 2. Na płaszczu silosu od strony zewnętrznej zakładano gipsowe plomby kontrolne. Plomby te były zakładane w 2000 r. trzykrotnie. Wszystkie plomby zostały nałożone na istniejące rysy pionowe na wysokości około 1,5 m powyżej poziomu terenu. Badania wizualne gipsowych plomb kontrolnych założonych na płaszczu silosu przeprowadzono dwukrotnie w 2000 r. oraz jednokrotnie w 2001 r. W przypadku plomb zarysowanych rozwarcia rys były niewielkie i nie przekraczały 0,1 mm. Najwięcej uszkodzeń dotyczyło pierwszej serii plomb założonych w 2000 r., które nastąpiły w okresie wiosny 2000 r. W efekcie uszkodzeń z tego okresu założono drugą serię plomb latem 2000 r. W przypadku plomb założonych jesienią 2000 r. i zimą 2001 r. nie stwierdzono żadnych pęknięć. Monitoring zmian uszkodzeń konstrukcji częściowo sprężonego silosu na klinkier uwiadczenia rys. 10. A zatem zmiany w czasie szerokości rozwarcia rys wskazywały na stopniowy zanik dalszej propagacji uszkodzeń.

#### 5. Podsumowanie

Diagnostyka zbiorników i silosów powinna być realizowana w oparciu o wiarygodne metody badawcze i obliczenia zgodne z normami PN-EN. Obecne wymogi stosowania zbioru norm serii PN-EN obejmują spełnienie

podstawowych wymagań z zakresu bezpieczeństwa, użyteczności, odporności ogniowej i stateczności podczas całego cyklu życia konstrukcji żelbetowych i sprężonych zbiorników na materiały sypkie i ciecze.

- Podczas całego okresu eksploatacji konstrukcja zbiornika powinna zachowywać użyteczność zgodną z przeznaczeniem, przy utrzymaniu odpowiedniego stopnia niezawodności i ekonomiki.
- Konstrukcja zbiornika powinna wytrzymywać wszystkie oddziaływania i wpływy powstałe podczas procesu wykonywania i eksploatacji.
- Nośność konstrukcji podczas wystąpienia oddziaływania ogniowego powinna być odpowiednia w odniesieniu do wymaganego czasu tego oddziaływania.



**Rys. 10.** Monitoring zmian uszkodzeń konstrukcji częściowo sprężonego silosu na klinkier

- Projekt zbiornika powinien zabezpieczać odporność konstrukcji na zagrożenia, takie jak eksplozje, uderzenia pojazdów, czy konsekwencje błędów ludzkich o zakresie nieproporcjonalnym do pierwotnej przyczyny (np. błędnego odczytu stopnia zapylenia komory). Należy przyjmować różne poziomy niezawodności, zarówno dla nośności, jak i dla użyteczności. Wprowadza się pojęcie projektowanego okresu użytkowania silosu, który należy wykorzystywać przy zestawianiu oddziaływań projektowych (takich jak na przykład obciążenia wyjątkowe czy oddziaływania sejsmiczne), uwzględnianiu pogarszania się właściwości materiałowych, oszacowaniu kosztów użytkowania konstrukcji i określaniu strategii utrzymania obiektu.

Konstrukcja powinna być zaprojektowana w taki sposób, aby procesy niszczenia nie wpływały na jej trwałość i zachowanie – przy przewidzianym poziomie obsługi

technicznej. Eurokody zakładają, że zostaną podjęte odpowiednie kroki w celu wytworzenia konstrukcji spełniającej wymagania projektowe. Działania te zawierają definicję wymagań, co do niezawodności, działań organizacyjnych i kontroli na etapie projektu, wykonawstwa, użytkowania i diagnozy stanu technicznego.

Skuteczny system zapewnienia jakości robót betonowych i zbrojarskich oraz kontroli sił sprężających, a także robót antykorozyjnych i zabezpieczających jest podstawą prawidłowej realizacji wzmocnień silosów i zbiorników. Atestowanie cięgien sprężających powinno dotyczyć również gwarantowanych cech w zakresie relaksacji. Podstawą realizacji zbiorników omawianego typu jest opracowanie programu sprężania. Program sprężania realizowanego za pomocą obręczy sprężających, składających się z poszczególnych kabli, powinien obejmować wymienione poniżej warunki techniczne, wymagania i raporty techniczne.

- Ogólny opis konstrukcji obiektu, materiały do sprężenia, a w tym: sploty sprężające, kanały kablowe oraz system kotwienia kabli – zakotwienia czynne i bierne.
- Technologia wprowadzania splotów do kanałów kablowych.
- Technologia sprężania, w tym: sprzęt do sprężania, tj. prasy i pompy hydrauliczne, wartości siły naciągu kabli, wymagana wytrzymałość betonu w chwili sprężania, numeracja obręczy i poszczególnych kabli sprężających, przewidywane wartości wydłużeń, kolejność i sposób naciągania kabli, kontrola siły sprężającej i dziennik sprężania.
- Ochrona systemu sprężenia przed korozją: receptura iniektu, sprzęt do iniekcji, badania zaczynu iniekcyjnego, tj. badanie płynności, badanie sedimentacji, badanie zmiany objętości i badanie wytrzymałości, wykonanie iniekcji, raport z iniekcji kanałów kablowych.
- Załączniki: formularze dzienników sprężania kabli i formularz raportu z iniekcji.

W czasie prowadzenia iniekcji kanałów kablowych należy sporządzać na bieżąco Raport z iniekcji, w którym należy zawrzeć informacje na temat wyników badań zaczynu iniekcyjnego, danych o temperaturze konstrukcji i otoczenia oraz wyników iniekcji kanałów kablowych.

Naprawy i termorenowacje zbiorników żelbetowych i sprężonych służą także zapobieganiu powstawania zagrożeń konstrukcyjnych. Wskutek eksploatacji takich zbiorników w złożonych warunkach środowiskowych dochodzi do uszkodzeń wymagających renowacji i wzmocnień. Renowacje te polegają na zastosowaniu nowego systemu ochrony antykorozyjnej konstrukcji, izolacji termicznej i/lub przeciwwilgociowej. Natomiast trwałość napraw i wzmocnień pozbawionych tego typu zabezpieczeń może być ograniczona. Warto podkreślić, że ocieplenie powłoki sprężonej (choćby metodą lekką) niezwykle podnosi jej trwałość; szczególnie istotne jest uniemożliwienie wykrapłania się pary wodnej w pobliżu stref zakotwienia cięgien.

W związku ze stanami awaryjnymi silosów żelbetowych zachodzi często konieczność ich wzmocnienia, jednak podczas analizowania tych konstrukcji często okazuje się, że ścisła ocena rzeczywistych zapasów bezpieczeństwa jest utrudniona ze względu na istniejące niejasności w zakresie obciążeń. Dlatego celowe jest kontynuowanie prac badawczych w zakresie analizy wpływu poszczególnych obciążeń i oddziaływań oraz dalsza analiza możliwie jak najdokładniejszych rozkładów sił wewnętrznych. Wzmocnienia omawianych silosów realizowane są obecnie zazwyczaj przy zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych, obejmujących zastosowanie dodatkowego zbrojenia sprężającego. Można także uznać za celowe zastosowanie taśm węglowych, które są nowoczesnymi kompozytami konstrukcyjnymi posiadającymi cenne parametry mechaniczne i odporność korozyjną. Ekspert szacując koszt wzmocnienia konstrukcyjnego silosu powinien brać pod uwagę nie tylko koszty bezpośrednie związane z ceną materiału, lecz również uwzględniać koszty wykonania prac oraz przyszłe koszty eksploatacji i konserwacji. Podstawową zaletą wzmocnienia taśmami węglowymi jest możliwość naklejania i sprężania tych taśm bez wznoszenia specjalnych rusztowań i bez użycia dźwigów, jedynie przy zastosowaniu rusztowań wiszących lub metod alpinistycznych. Sposoby wzmocnień silosów zmieniały się wraz z rozwojem techniki, pewne sposoby zarzucono na rzecz nowych technologii. Kierunek rozwoju polega na podnoszeniu efektywności i trwałości przy równoczesnym obniżaniu ciężaru wzmocnienia.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Halicka A., Franczak D., Projektowanie zbiorników żelbetowych. T. 2. Zbiorniki na ciecze, PWN, Warszawa, 2012
- [2] Kuś S., Konstrukcje sprężone kołowo-symetryczne. Arkady, Warszawa 1960
- [3] Lewiński P., Analiza współpracy żelbetowych zbiorników cylindrycznych z podłożem. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Rozprawy, Wydawnictwa ITB, Warszawa 2007
- [4] Lewiński P., Zasady projektowania zbiorników żelbetowych na ciecze z uwzględnieniem wymagań Eurokodu 2. Przykłady obliczeń, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2011
- [5] Lewiński P. M., Modele sprężyste współpracy żelbetowych i sprężonych silosów cylindrycznych z podłożem. W: „Monografie Zakładu Wytrzymałości Materiałów, Teorii Sprężystości i Plastyczności”, T. 3, rozdział IX, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013, s. 121-134
- [6] Runkiewicz L., Plechawski S., Silosy żelbetowe na materiały sypkie po wzmocnieniu. 11. Konf. „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, Świeradów Zdrój, 18-21 października 2000, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000, s. 177-184
- [7] Runkiewicz L., Zasady oceny bezpieczeństwa i wzmocnienia silosów żelbetowych. Instytut Techniki Budowlanej, Instrukcje, Wytyczne, Poradniki ITB, nr 366, Warszawa, 2000
- [8] Runkiewicz L., Zasady wykonywania i odbioru robót zbiorników żelbetowych. Poradnik Inspektora Nadzoru, Cz.1.: nr 5, 2008, s. 6-15, Cz.2.: nr 6, 2008, s. 15-24
- [9] Runkiewicz L., Analizy zagrożeń, awarii i katastrof żelbetowych zbiorników i silosów. Przegląd Budowlany, Nr 4/2012, s. 75-79
- [10] Witakowski P. (red.), Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych. Instytut Techniki Budowlanej, Instrukcje, Wytyczne, Poradniki ITB, nr 443, Warszawa, 2009