

Efektywność nowych technologii wzmocnienia żelbetowych i wstępnie sprężonych silosów i zbiorników w świetle wieloletniego monitoringu

Prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz, dr hab. inż. Paweł Lewiński, prof. nadzw. w ITB

1. Wprowadzenie

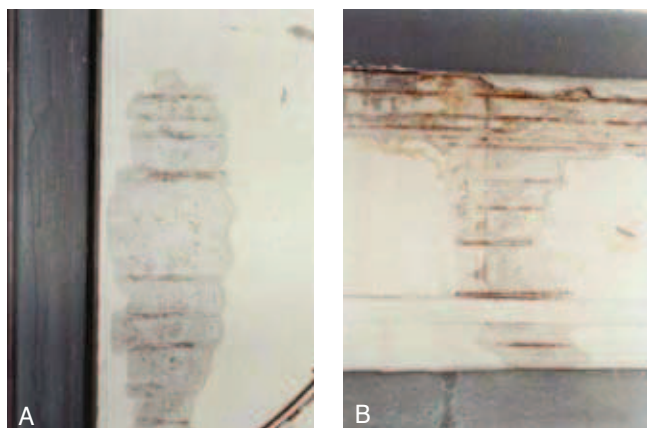
W Polsce od szeregu lat realizowane są ekspertyzy i opinie naukowo-badawcze dotyczące stanu technicznego konstrukcji silosów i zbiorników z betonu użytkowanych w przemyśle oraz w gospodarce wodno-ściekowej. Wiele spośród przebadanych obiektów znajdowało się w stadium awaryjnym lub przedawaryjnym, a także wystąpiło szereg dotkliwych katastrof budowlanych tych konstrukcji. W celu zapobiegania stanom awaryjnym prowadzone były szczegółowe badania *in situ* oraz analizy obliczeniowe, z których wypływały wnioski odnośnie wzmocnienia omawianych obiektów. Wśród sposobów wzmocnienia istniejących konstrukcji zbiorników i silosów żelbetowych lub z betonu sprężonego często stosowaną metodą stanowi wzmocnienie obwodowe za pomocą cięgien lub prętów sprężających. Technologie wzmocnienia omawianych konstrukcji były doskonałe i dzięki temu znaczna część zagrożonych silosów i zbiorników nie została przeznaczona do wyburzenia, lecz poddana wzmocnieniom i ponownie włączona do eksploatacji. Wśród osiągnięć ośrodków naukowych wdrażających technologie wzmocnienia konstrukcji silosów i zbiorników żelbetowych i wstępnie sprężonych za pomocą cięgien sprężających szczególną uwagę zwracają dokonania w tym zakresie ekspertów z Politechniki Warszawskiej (Knauff, Kalisz, Donten, Sadowski – system SNOKO [2]), Politechniki Krakowskiej (Dyduch, Seruga, Płachecki – system bezprzyczepnościowy [3, 4, 14]) oraz Politechniki Wrocławskiej (Kamiński i in. [3]). Różne technologie wzmocnień tych konstrukcji stosowali także w szerokim zakresie eksperci ITB [9–13]. Wcześniej stosowane metody zastąpiono w latach ubiegłych nowymi technologiami o większej skuteczności i trwałości. Wprowadzone zostały nowe systemy kotwienia i nowe zabezpieczenia cięgien sprężających, a także nowe materiały do sprężania konstrukcji. Autorzy artykułu mieli swój udział we wdrażaniu tych nowych wówczas technologii. Jednak od momentu wdrożenia omawianych technologii upłynęło już nieco czasu i autorzy przedstawiają w niniejszym artykule aktualne kierunki rozwojowe sposobów wzmocnienia silosów i zbiorników żelbetowych i wstępnie sprężonych.

2. Zagrożenia konstrukcji silosów i zbiorników żelbetowych

Wprowadzenie współczesnych technologii wzmocnienia silosów i zbiorników żelbetowych i wstępnie sprężonych za pomocą cięgien bez przyczepności zostało poprzedzone realizacjami pilotażowymi w przypadkach zagrożeń konstrukcyjnych, których usuwanie wymagało zastosowania nowych technologii wzmocnienia. Pierwsze doświadczenia w zakresie zastosowania omawianych technologii do wzmocnienia obwodowego konstrukcji za pomocą cięgien sprężających uzyskano w wyniku realizacji zaleceń ekspertyzy ITB opracowanej w celu usunięcia skutków awarii baterii silosów strunobetonowych



Rys. 1. Silosy strunobetonowe do przechowywania cukru – po przeprowadzeniu prac naprawczych



Rys. 2 Układ skorodowanych strun silosu nr 2 (a), skorodowanie i ubytek dwóch strun silosu nr 1 (b)

do magazynowania cukru wzniesionych w połowie lat sześćdziesiątych w Cukrowni „Werbkowice”. Widok tych silosów już po przeprowadzeniu prac naprawczych przedstawia rysunek 1. Silos nr 1, powiązany konstrukcyjnie z wieżą operacyjną elewatorów wysokości 46,55 m oraz silos nr 2 stanowiły baterię dwóch bliźniaczych komór wysokości (przy gzymsie) 41,8 m i o średnicy wewnętrznej 22 m. Dolną część ściany zewnętrznej, usytuowaną poniżej poziomu płyty dennej komory, zaprojektowano jako żelbetową monolityczną grubości 35 cm, a część górną, wykonaną powyżej w ślizgu – jako powłokę żelbetową grubości 18 cm.

Pierwotnie powłoki obu silosów sprężono przez nawijanie za pomocą nawijarki karuzelowej typu „Pająk” [5]. Od poziomu +3,13 m n.p.t. do poziomu +36,0 m zaprojektowano sprężenie strunami $\varnothing 5$ mm o wytrzymałości na rozciąganie 1471 MPa przy założonym minimalnym rozstawie strun u dołu 2,3 cm, przy czym do mocowania strun do ścian posłużyły zaciski stalowe. Ponad komorą na poziomie + 35,6 m oba silosy połączone łącznikiem o konstrukcji stalowej, a w części podziemnej – korytarzem. Pomieszczenie klimatyzatorni umieszczono pomiędzy komorami, nad szczeliną dylatacyjną płyt fundamentowych. Podpory słupowe stropów płyty dennej komór silosów na poziomie +2,2 m opierały się na płycie fundamentowej posadowionej na poziomie -2,8 m.

W styczniu 1995 r. nastąpiła awaria strun sprężających, której towarzyszył efekt akustyczny, dzięki czemu zwrócono uwagę na powstałe zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji. Eksperti ITB przeprowadzili szczegółowe badania, których wyniki zostaną tu pokrótce omówione. Prace obejmujące badania *in situ* baterii silosów strunobetonowych, oprócz badań materiałowych, dotyczyły m.in. inwentaryzacji uszkodzeń. Podczas badań stwierdzono, że w przypadku powłoki silosu nr 1 nastąpiło zerwanie czterech strun, a powłoki silosu nr 2 – dwóch strun sprężających powłokę. Ponieważ styk daszku pomieszczenia klimatyzatorni ze ścianami

silosów nie był szczelny, doszło do zamakania tego miejsca w wyniku oddziaływania wód opadowych i nastąpiło zerwanie strun pod stropem tego pomieszczenia. Wskutek sprężynowania strun w chwili ich zerwania został odspojony torkret. Zakres uszkodzeń szczegółowo określono w wyniku badań w odkrywkach; rysunek 2a przedstawia układ skorodowanych strun silosu nr 2, zaś rysunek 2b – skorodowanie i ubytek dwóch strun silosu nr 1. Występowały tam głębokie wżery korozyjne na zerwanych strunach, ciągnące się na znacznej długości. Jeszcze kilka pojedynczych strun pozbawionych naciągu stwierdzono w wyższych partiach silosu nr 1. Ponadto rzeczywisty rozstaw strun znacznie odbiegał od założonego w projekcie, co stwierdzono podczas badań przy wykonywaniu kilkunastu rozległych odkrywek, przy czym okazało się, że największe różnice występują u dołu obu komór. Były to miejsca, gdzie struny rozmieszczone zostały najgęściej, a jednocześnie ich przekroje były najbardziej wyteżone. Niedobory te w niektórych strefach dochodziły do ponad 40%.

Ponadto zamiast projektowanego torkretu o wytrzymałości na ściskanie 20 MPa, jak stwierdzono podczas badań, zastosowano zwykły tynk cementowo-wapienny grubości od 8 do 17 mm, nakładany tynkownicą, zawierający liczne nieregularne spękania o charakterze skurczowym. Stwierdzono też znaczne obniżenie średnic strun (do $\varnothing 4,7$ mm) w stosunku do wartości nominalnej ($\varnothing 5$ mm) w silosie nr 2. W silosie nr 1 w miejscu styku płaszcza górnego z dolnym, w odkrywce na poziomie +2,2 m, stwierdzono wysunięcie płaszcza górnego poza obrys dolnego o 6 cm, przy czym połączenie to było nieszczelne. Zainicjowana wcześniej propagacja szeregu rys pionowych o szerokości rozwarcia do 1 mm w nadkomorowej i podkomorowej części silosów ulegała zatrzymaniu.

Silos nr 1 posadowiony jest na wspólnym fundamencie i połączony z wieżą operacyjną, jednak mimo to różnica obciążeń i osiadań obu części składowych konstrukcji spowodowała, że wzdłuż styku obu konstrukcji wystąpiły liczne pęknięcia i w miejscach łączenia doszło do uszkodzenia wieży oraz „torkretu” na ścianie silosu. Na podstawie analiz wyników badań przeprowadzonych *in situ* obydwu silosów stwierdzono, że zerwanie strun oraz ich nieprawidłowe rozstawy w płaszczech doprowadziły do znacznego ubytku wymaganego obliczeniowo docisku radialnego od sprężenia. Ponadto silosy podczas rozładunku wykazywały nadmierne drgania. Aby zniwelować ubytek sprężenia podjęto odpowiednie działania naprawcze. Poawaryjne doraźne zabezpieczenie silosów polegało na ponownym zakotwieniu w ścianie zerwanych strun i założeniu lin zabezpieczających. Sformułowano zalecenia obejmujące naprawę cylindrycznych ścian silosów, odtworzenie stanu pierwotnego uzwojenia sprężającego płaszcza w zakresie możliwym do wykonania oraz wzmocnienie obu silosów poprzez dodatkowe sprężenie obwodowe za pomocą

ciągłen. Zgodnie z opracowanymi zaleceniami do ekspertyzy ITB dokonano także szeregu innych czynności przywracających trwałość konstrukcji.

Kolejne doświadczenia w zakresie zastosowania technologii sprężania zbiorników żelbetowych kablami bez przyczepności uzyskano w wyniku realizacji zaleceń ekspertyzy ITB opracowanej na okoliczność utraty szczelności osadnika wstępnego, będącego jednym z obiektów oczyszczalni ścieków, stanowiącego zblokowany zespół żelbetowych komór, kanałów i pomieszczeń funkcyjnych. Osadnik, który składa się z połączonych konstrukcyjnie elementów ściennych, koryt, kanałów i płyty dennej, przykrytych stropami lub pokrywami typu lekkiego, został wykonany w latach 1998–2005. Osadnik ma wymiary w planie $57,0 \times 31,0$ m i zmienną wysokość 7,93–11,74 m. Największe komory żelbetowe osadnika to zespół komór zgarniaczy składający się z 3 komór A, B i C konstrukcyjnie połączonych z pozostałą częścią żelbetowej konstrukcji obiektu. Komory A i B są częściowo zblokowane, mając wspólną zewnętrzną ścianę podłużną, zaś ściany poprzeczne są oddzielne. Komory zgarniacza mają wymiary wewnętrzne $15,0 \times 15,0$ m i wysokość zewnętrzną 8,13 m. Ściany podłużne i poprzeczne komór skrajnych zaprojektowano o grubości 60 cm, ale część ścian wewnętrznych pocieniono na całej lub w połowie wysokości do 40 cm. Beton przewidziano w projekcie jako wodoszczelny klasy B35 W8, którą podczas badań in situ określono na B30–B37. Dno zbiornika stanowi płyta żelbetowa o grubości 60 cm.

Początkowo badaniami ITB przeprowadzonymi po raz pierwszy w 2008 r. objęte zostały komory zgarniaczy osadnika wstępnego, w których stwierdzono występowanie zarysowań i brak szczelności konstrukcji, toteż ścieki w wielu miejscach przenikały przez rysy. Zinwentaryzowane rysy to pionowe pęknięcia przelotowe biegnące przez prawie całą wysokość ściany. Zbrojenie poziome, z uwagi na znaczną szerokość rys (do 0,5 mm), było zagrożone korozją, o czym świadczyły charakterystyczne wycieki. Przyczyny uszkodzeń zbiornika leżały po stronie projektu (niski stopień zbrojenia) i wykonania. Wynikało to z szeregu zjawisk, takich, jak skurcz betonu, powodujący, według obliczeń ekspertyzy, zarysowania ścian oraz powstałe z różnych powodów nieuszczelności przerw roboczych, a także niedostateczna sztywność szalunków. Stwierdzono również uszkodzenia powłoki izolacyjnej ścian (złuszczenia) prowadzące w dłuższym czasie do osłabienia konstrukcji.

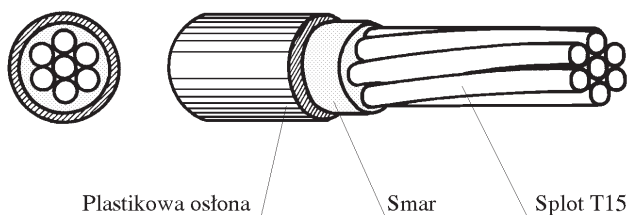
3. Wprowadzenie współczesnych technologii wzmocnienia silosów i zbiorników

Obydwa silosy do magazynowania cukru, ze względu na ich zły stan techniczny, należało wzmocnić na całej wysokości komór przy przyjęciu jednakowej dla obydwu silosów liczby ciągłen i doprowadzeniu ich do poziomu stropu nad komorą. W roku 1995 zalecenia ekspertyzy

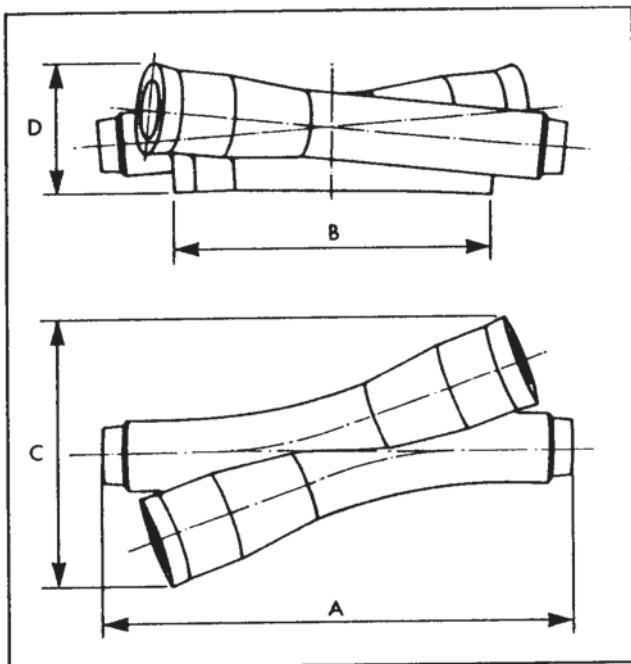
zostały zrealizowane w odniesieniu do silosu nr 1. Wzmocnienie silosu wykonano w ciągu 20 dni roboczych. W ekspertyzie ITB wspomniano o kilku systemach wzmocnienia silosów, ale niskotarciowy system sprężania (NSS) z wykorzystaniem zakotwień Freyssineta typu X (aczkolwiek w Polsce jeszcze nie stosowany) został określony jako jeden z najbardziej racjonalnych. Po rozpatrzeniu przedłożonych ofert właściciel obiektu wybrał wariant realizacji wzmocnienia przy wykorzystaniu systemu NSS Freyssineta [15], gdyż w pozostałych ofertach proponowano długie terminy wykonania wzmocnienia, które kolidowały z czasem rozpoczęcia kampanii cukrowniczej. W celu określenia sposobu wzmocnienia silosów do magazynowania cukru z uwzględnieniem ich napełniania do pełnej wysokości komór przeprowadzono w ramach ekspertyzy ITB analizę statyczno-wytrzymałościową, wykorzystując do tego celu oprogramowanie przeznaczone do obliczeń silosów i zbiorników (opracowane przez drugiego autora [6, 7]). W wyniku obliczeń i analiz stwierdzono, że ściany obu silosów należy wzmocnić przez doprężenie na całej wysokości na następujące siły obwodowe:

- na wysokości od 0,00 do 10,00 m: 1100 kN/m,
- na wysokości od 10,00 do 15,00 m: 950 kN/m,
- na wysokości od 15,00 do 20,00 m: 800 kN/m,
- na wysokości od 20,00 do 25,00 m: 550 kN/m,
- na wysokości od 25,00 do 30,00 m: 300 kN/m,
- na wysokości od 30,00 do 35,00 m: 150 kN/m.

Podane wartości obliczono przy założeniu ocieplenia ścian na całej wysokości. Zaprojektowano wzmocnienie przewidujące zastosowanie 115 kabli sprężających typu Freyssineta (o sile sprężającej 160 kN każdy) w osłonkach z tworzywa sztucznego HDPE i zabezpieczonych smarem, tj. za pomocą systemu NSS wraz z zakotwieniami typu X. Poglądowy rysunek kabla przedstawiono na rysunku 3. Ówczesny model zakotwienia typu X pokazano na rysunku 4. Zastosowane kable o symbolu T15S (o powierzchni przekroju stali sprężającej 150 mm^2) miały siłę zrywającą 279 kN. Kable ułożono na całej wysokości komory silosu w zmiennym rozstawie, 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 cm, a obudowę ocieplenia z blachy trapezowej powlekanej tworzywem. Zalecenia ekspertyzy dotyczące wzmocnienia silosu nr 2 zrealizowano w roku 1996. Usuwanie zagrożenia konstrukcyjnego, jakie wystąpiło w przypadku opisanej powyżej awarii baterii silosów na cukier, przy zastosowaniu metod tradycyjnych byłoby kosztowne, skomplikowane i nie gwarantowałoby należytej trwałości. 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.

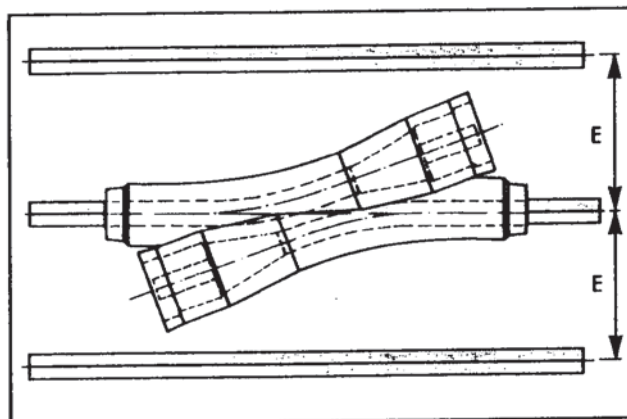


Rys. 3. Poglądowy rysunek kabla



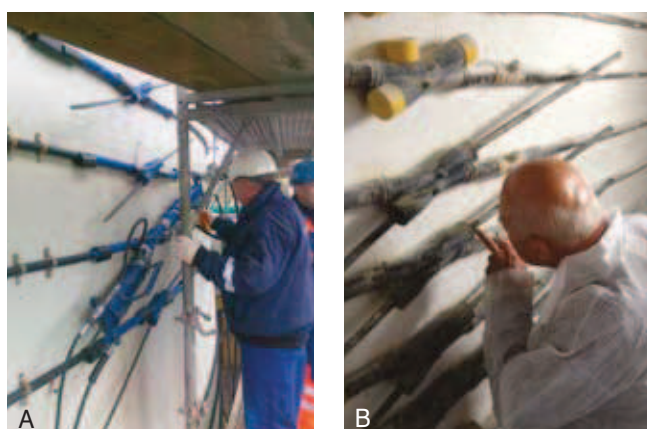
Rys. 4. Wcześniejszy model zakotwienia typu X

tylko jedno zakotwienie na obwodzie, co zapewnia łatwość i krótki czas montażu przy zachowaniu efektywnej kontroli naciągu kabli. Ważne było także to, aby przy wzmacnianiu 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. Kompletny ściąg wykonywany jest w wytwórni. Dodatkowym zabezpieczeniem jest zewnętrzna rura z tworzywa sztucznego wypełnio-



A	B	C	D	E
280	190	160	80	145* 210

* ze specjalnym oprzyrządowaniem



Rys. 5. Sprężanie powłoki zbiornika kablami z zastosowaniem zakotwienia Freyssineta typu X i dwóch pras M23 (a), monitorowanie systemu sprężenia wzmocnionego silosu na cukier (b)

Istotną sprawą jest też możliwość wyeliminowania pilastrów do kotwienia kabli poprzez zastosowanie zakotwienia krzyżowego typu X, dzięki czemu wykonuje się

na zaprawą cementową. Rura ta zabezpiecza osłonki kabli przed uszkodzeniami mechanicznymi i zmniejsza docisk do powierzchni płaszcza.

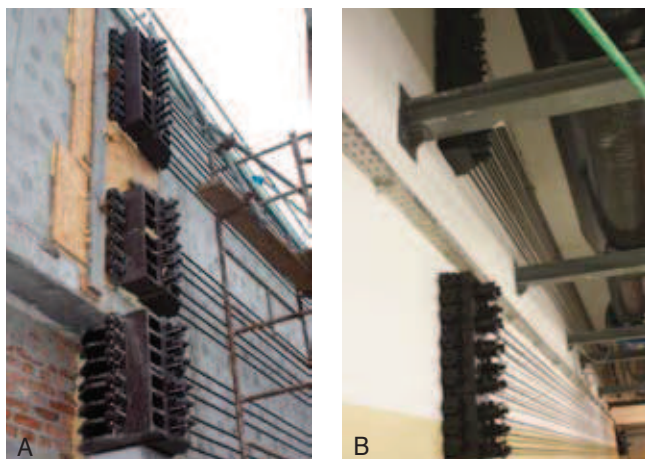
Sprężenie metodą NSS polegało na:

- założeniu rur z HDPE wokół konstrukcji w odstępach wynikających z obliczeń,
- wprowadzeniu do rur bezprzyczepnościowych kabli sprężających w liczbie określonej projektem,
- zainstalowaniu zakotwień kabli Freyssineta typu X,
- wykonaniu klasycznej iniekcji rur za pomocą zaprawy cementowej,
- sprężeniu kabli do siły określonej w projekcie,
- zakotwieniu kabli,
- wykonaniu zabezpieczenia antykorozyjnego zakotwień.

Prawidłowość założeń do projektu wzmocnienia silosów na cukier, podanych w ekspertyzie ITB, potwierdziło wieloletnie monitorowanie systemu sprężenia wzmocniającego silosy (rys. 5b).

W przypadku zarysowanych i nieszczelnych komór opisanego wyżej osadnika wstępnego w wyniku realizacji

zaleceń ekspertyzy ITB z 2008 r. wszystkie komory zgarniacza A, B i C sprężono kablami, przy czym każdą komorę sprężono oddzielnie (rys. 6). Sprężenie zrealizowano za pomocą kabli bez przyczepności jednosplotowych o niskiej relaksacji systemu BBR o wytrzymałości na rozciąganie 1860 MPa, w osłonkach HDPE wypełnionych smarem. Kable zakotwiono w stalowych blokach kotwiących umiejscowionych w narożach komór. Na niektórych odcinkach zastosowano ponadto dewiatory kierunkowe celem eliminacji nadmiernych naprężeń rozciągających w ścianach zewnętrznych. Poszczególne ściany sprężono 30 lub 36 kablami. Ponadto zrealizowano kompleksowy program naprawczy elementów żelbetowych zbiornika, które następnie zabezpieczono zestawem elastycznych materiałów powłokowych firmy Sika. 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.



Rys. 6. Sposób wzmocnienia kablami ścian żelbetowych komór zgarniaczy osadnika wstępnego: a) wzmocnienie ścian zewnętrznych, b) wzmocnienie ścian wewnętrznych

Przeprowadzono ponowną analizę statyczno-wytrzymałościową obiektu za pomocą MES przy wykorzystaniu programu ARSA 2011 w oparciu o pełną dokumentację techniczną, z uwzględnieniem współpracy konstrukcji z podłożem. Opracowano przy tym model numeryczny wstępnego sprężenia, wyjaśniono przyczyny zarysowań i przeanalizowano (pozytywny) wpływ wstępnego sprężenia. Obliczenia sprawdzające nie wykazały na tym etapie przekroczeń nośności przekrojów komór i kanałów żelbetowych, ale było to możliwe dzięki realizacji zaleceń ekspertyzy ITB z 2008 r., obejmujących m.in. sprężenie ścian komór zgarniaczy. Nie miało to natomiast negatywnego wpływu na pozostałe komory i kanały, w których niedobór zbrojenia był znacznie mniejszy, niż w przypadku komór zgarniaczy. Na tej podstawie stwierdzono, że dzięki realizacji zaleceń ekspertyzy ITB z 2008 r. przywrócono trwałość

i właściwe użytkowanie konstrukcji. Natomiast z tych samych obliczeń wynikało, że skurcz betonu mógł być przyczyną powstania szeregu rys, zwłaszcza że mieliśmy tu do czynienia z niewłaściwie zaprojektowanym zbrojeniem; przekroje zbrojenia elementów konstrukcji komór zgarniaczy przyjęto niższe, niż to było wymagane przez normę jako minimalny przekrój zbrojenia. W elementach żelbetowych nie zastosowano prawidłowego zbrojenia przeciwskurczowego.

4. Kontrola i monitoring sprężenia konstrukcji silosów

Zalecenia omawianej ekspertyzy ITB zostały zrealizowane, przy czym była to pierwsza w Polsce realizacja wzmocnienia konstrukcji powłoki silosu metodą NSS. To przedsięwzięcie stanowiło asumpt do zastosowania omawianej metody wzmocnienia w wielu kolejnych przypadkach obejmujących naprawy obiektów o podobnej konstrukcji. Na tym jednak nie poprzestano i po realizacji zaleceń ekspertyzy dotyczącej baterii silosów na cukier rozpoczęto rozłożony w czasie proces monitoringu systemów sprężenia w obiektach wzmocnionych przy zastosowaniu nowych technologii. Fragmenty kabli sprężających typu Freyssineta pozostawiono celowo bez zabezpieczeń tak, aby umożliwić monitoring zakotwienia kabli sprężających i pomiary poślizgów cięgien (rys. 5b).

Przykłady innych zastosowań w zakresie wzmocnienia konstrukcji silosów z wykorzystaniem niskotarciowego systemu sprężania z zakotwieniami typu X, w tym cytowane wyżej opracowania ekspertów Politechnik: Krakowskiej, Wrocławskiej i Świętokrzyskiej, to np. wzmocnienie przez sprężenie 5. silosów na rzepak w NZPT SA w Brzegu (1996 r.), wzmocnienie silosów w przedsiębiorstwie „Bolmar” Tuszcz Roślinne w Bodaczowie (1998 r.), wzmocnienie silosu nr 4 w Cukrowni Krasnyślaw (1999 r.), wzmocnienia silosów żelbetowych Nr 2 i Nr 4 w Zakładach Wapienniczych Lhoist SA w Bukowej (l. 2007–2009), czy wzmocnienia cokołów silosów żelbetowych w Zakładach EWICO w Brzegu (2006 r.). W wyniku prowadzonych wieloletnich kontroli stan techniczny wszystkich kabli bezprzyczepnościowych (wraz z ich blokami kotwiącymi), wzmocniających silosy na cukier i in. materiały sypkie oraz zbiorniki na ciecz, oceniono pozytywnie. Dwudziestoletnie monitorowanie opisanych tu wzmocnień silosów na cukier potwierdziły również ich trwałość i niezawodność.

5. Postęp w technologii wzmocnienia konstrukcji silosów i zbiorników

5.1. Modernizacja systemu NSS

System NSS od 1995 r. przeżył pewną ewolucję, ale zasadnicze idee nie uległy zmianie i ten rodzaj wzmocnienia okazał się efektywny. Zakotwienie cięgien obwodowych Freyssineta typu X składa się obecnie z odlewu

z żeliwa sferoidalnego, opartego na konstrukcji kołowo-symetrycznej, służącego jako zakotwienie dla obu końcówek jednej lub dwóch obejm cięgnowych o promieniu do 27,5 m [15]. Żeliwo sferoidalne ma dobre właściwości wytrzymałościowe i poślizgowe. Może ulegać odkształceniu bez uszkodzeń, jest odporne na ściskanie i zginanie oraz na wysokie ciśnienia. W aprobacie dla system sprężania [15] przedstawiono zakotwienie 1 X – stosowane jest przy wykonywaniu jednej obejm ściągniętej (rys. 32 aprobaty [15]) oraz zakotwienie 2 X – stosowane jest do zakotwienia dwóch obejm, każda owinięta jest raz lub dwukrotnie wokół konstrukcji (rys. 33 aprobaty [15]). Zamieszczono tam także rysunki złączek adaptacyjnych do prasy jednosplotowej dla zakotwień 1X13–1X15 oraz 2X13–2X15 (odpowiednio rys. 55 i 56 aprobaty [15]). Konieczność zastosowania zewnętrznych rur ochronnych potwierdziły wieloletnie doświadczenia. Odpowiednio skonstruowane połączenie pomiędzy zakotwieniem, zewnętrzną rurą i samym kablem zapewnia pełne zabezpieczenie antykorozyjne we wszystkich neralgicznych miejscach. Dużą zaletą zakotwienia typu X w systemie NSS jest wielostopniowe zabezpieczenie miejsca kotwienia – szczęk kotwiących przed korozją. Zabezpieczenie to uzyskano poprzez całkowite schowanie szczęk kotwiących w bloku zakotwienia wypełnionego w tej strefie smarem oraz zamknięcie strefy kotwienia dwoma deklami i żywicą epoksydową, zapewniając w ten sposób pełną wodoszczelność rozwiązania. Podczas wykonywania wzmocnienia kablami w systemie NSS należy zwracać szczególną uwagę na szczelność połączeń osłonek kablowych z blokami kotwiącymi za pomocą rurek termokurczliwych. Istota nowo wprowadzonych zmian polegała na możliwości zastosowania cięgien odpornych na korozję, zastosowaniu zakotwień zblokowanych oraz na optymalizacji geometrycznej tras cięgien sprężających w strefie zakotwienia. Kierunek rozwoju polega na podnoszeniu efektywności sprężenia poprzez obniżanie strat siły sprężającej, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwie równomiernego docisku radialnego cięgien sprężających do ściany zbiornika. Dąży się także do zapewnieniu jak największej trwałości rozwiązania konstrukcyjnego przy równoczesnym obniżaniu ciężaru samego wzmocnienia.

6. Sterowanie przyczepnością cięgien sprężających

Przyjęcie systemu przyczepnościowego lub bezpryczepnościowego zależy od szeregu czynników. W wielu sytuacjach projektowych, takich, gdy wymagane jest na przykład:

- powtórne przeprowadzenie naciągu,
 - pozostawienie możliwości wymiany kabla,
 - kontrolowanie siły w kablu sprężającym,
- konieczne jest zastosowanie systemu bezpryczepnościowego.

Ale przyjęcie takiego systemu nie jest bezwarunkowe; norma PN-EN 1992-3 [1] w p. 8.10.1 *Rozmieszczenie cięgien sprężających i kanałów kablowych*, zauważa, że w konstrukcjach pracujących w podwyższonej temperaturze, zawierających pionowe cięgna bez przyczepności, mogą wystąpić wycieki smarów zabezpieczających cięgna. Zdaniem autorów normy, aby uniknąć tego efektu, najlepszym rozwiązaniem jest wyeliminowanie bezpryczepnościowych cięgien jako pionowego zbrojenia sprężającego. Jeśli jednak zostanie ono użyte, należy podjąć starania w celu kontrolowania stanu obecności smarów zabezpieczających i ich uzupełnianie w razie konieczności. Inny problem wynikający z zastosowania systemu bezpryczepnościowego to problem obliczeniowy, polegający na dużej rozbieżności rzeczywistych naprężeń w stosunku do wartości normowych. W związku z występowaniem znacznych strat siły sprężającej spowodowanych tarciami na krzywiznie wypracowano dwie zasadnicze koncepcje cięgien sprężających ze zmienną przyczepnością:

- zmianę przyczepności zapewnia opóźnienie czasu wiązania zaczynu iniekcyjnego,
- zmienna przyczepność wynika z zastosowania żywicy epoksydowej wraz z utwardzaczem, którą nakłada się na powierzchnię cięgna sprężającego przed jego montażem. Jednym z celów tego wynalazku jest zapewnienie szczelnej otuliny cięgna w konstrukcji z betonu sprężonego, tak że nie zachodzi konieczność iniektowania zaczynu do osłonki kablowej, zapewniona jest przyczepność do betonu konstrukcji po naprężeniu cięgna i całkowite zabezpieczenie cięgna przed korozją. Utwardzanie żywicy następuje pod wpływem czynnika zewnętrznego, np. temperatury i może być rozłożone w czasie.

Idea sterowania przyczepnością cięgien sprężających po ich wstępnym naprężeniu jest dość pociągająca, zwłaszcza przy dużych stratach tarcia na krzywiznie. Ma ona jednak pewne wady, co zostanie przedstawione we wnioskach.

7. Podsumowanie

Wieloletnie dotychczasowe doświadczenia i monitorowanie wzmocnień zbiorników i silosów żelbetowych i wstępnie sprężonych potwierdzają zasadność i poprawność stosowania wprowadzonych do praktyki w ciągu ostatnich 20 lat technologii wzmocnień. Wprowadzanie nowych technologii powinno być poprzedzone badaniami laboratoryjnymi i realizacjami pilotażowymi. Należy brać pod uwagę wady i zalety nowych rozwiązań. Stosowanie pełnej przyczepności cięgien, nawet używanej dopiero po ich zakotwieniu, uniemożliwia powtórne przeprowadzenie naciągu, pozostawienie możliwości wymiany kabla czy kontrolowanie siły w kablu sprężającym. Z drugiej strony, utwardzanie żywicy, zapewniającej przyczepność po zakotwieniu cięgna, w wyniku działania czynnika zewnętrznego takiego, jak

np. temperatura, wymaga ostrożnego postępowania, gdyż podwyższona temperatura może spowodować zwiększoną relaksację naprężeń w cięgnię. Należałoby przeanalizować doświadczalnie, czy spowodowane wzrostem temperatury i zwiększoną relaksacją straty siły sprężającej nie przekraczałyby redukcji strat siły sprężającej spowodowanych tarciami na krzywiznie. Tak więc wprowadzenie wszelkich tego rodzaju innowacji technologicznych wymaga wielu badań i analiz w akredytowanych laboratoriach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1992-3:2008 Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze
- [2] Donten K., Knauff M., Sadowski A., Wzmacnianie zarysowanych zbiorników z betonu, Mat. Konferencji Naukowo-Technicznej Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Wrocław-Szklarska Poręba, 2-4 grudnia 1992 r., s. 251-258, 1992
- [3] Dyduch K., Kamiński M., Mrozowicz J., Wzmocnienie silosów żelbetowych poprzez sprężenie cięgnami zewnętrznymi, niskotarciowymi, Konferencja Naukowo-Techniczna Awaryjne Budowlane, Międzyzdroje, s. 217-224, 1997
- [4] Dyduch K., Plachecki M., Metody wzmocnienia przez sprężenie żelbetowych zbiorników na ciecze i materiały sypkie, XIII Konferencja Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Referaty, CD-R, Wrocław-Szklarska Poręba, Wrocław, 2007
- [5] Kuś S., Włodarz A., Żorawski A., Konstrukcje sprężone, PPP T. 117, BSiPTBP, Warszawa, 1966
- [6] Lewiński P. M., Modele sprężyste współpracy żelbetowych i sprężonych silosów cylindrycznych z podłożem. W: Monografie Zakła-

du Wytrzymałości Materiałów, Teorii Sprężystości i Plastyczności, T. 3, rozdział IX, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, s. 121-134, 2013

- [7] Lewiński P., Analiza współpracy żelbetowych zbiorników cylindrycznych z podłożem, Prace Naukowe ITB, Rozprawy, Wydawnictwa ITB, Warszawa, 2007
- [8] Łapko A., Wybrane problemy eksploatacyjne istniejących zbiorników żelbetowych, XIII Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztat Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego, Kielce – Cedzyna, 21-23 maja 2014 roku, Wyd. ZG PZITB, Warszawa, s. 262-282, 2014.
- [9] Runkiewicz L., Analizy zagrożeń, awarii i katastrof żelbetowych zbiorników i silosów. Przegląd Budowlany, s. 75-79, Nr 4/2012
- [10] Runkiewicz L., Lewiński P., Diagnostyka, wzmacnianie i monitorowanie żelbetowych i sprężonych zbiorników na materiały sypkie i ciecze, Przegląd Budowlany, s. 25-32, nr 10/2014
- [11] Runkiewicz L., Lewiński P., Stany awaryjne silosów sprężonych i sposoby ich wzmacniania, Przegląd Budowlany, s. 21-23 i s. 35, nr 1/1997
- [12] Runkiewicz L., Plechawski S., Silosy żelbetowe na materiały sypkie po wzmocnieniu. XI Konf. Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Świeradów Zdrój, 18-21 października 2000, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, s. 177-184, Wrocław, 2000
- [13] Runkiewicz L., Zasady oceny bezpieczeństwa i wzmacniania silosów żelbetowych, Instytut Techniki Budowlanej, Instrukcje, Wytyczne, Poradniki ITB, nr 366, Warszawa, 2000
- [14] Seruga A., Analiza stanów naprężenia i odkształcenia w powłokach zbiorników cylindrycznych z betonu sprężonego, Seria: Inżynieria Ładowa, Monografia Tom 289, Politechnika Krakowska, Kraków, 2003
- [15] System Freyssinet do sprężania konstrukcji, Europejska Aprobata Techniczna nr ETA-06/0226, EOTA Europejska Organizacja ds. Aprobata Technicznych, Bruksela, 2012

II Konferencja Naukowo-techniczna, Opole 25-28 kwietnia 2016 „Zagadnienia inżynierii środowiska w budownictwie”

ORGANIZATORZY KONFERENCJI

Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa
Oddział w Opolu
Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej
Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych
Oddział w Opolu
Opolska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa
przy współudziale
Oddziału PAN w Katowicach, Komisja Ochrony Środowiska
i Gospodarki Odpadami

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący: dr inż. Wiesław Baran - Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa Oddział w Opolu
Członkowie: dr hab. inż. Adam Rak, prof. PO – Opolska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa, dr inż. Jan Mizera – Oddział PAN w Katowicach, Komisja Ochrony Środowiska i Gospodarki Odpadami, mgr inż. Zenon Mieruszyński – Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział w Opolu
Sekretarz: dr inż. Jan Centkowski - Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa Oddział w Opolu
Sekretariat: Joanna Wojdak

TEMATYKA KONFERENCJI

Prace naukowe i przeglądowe z dziedziny budownictwa oraz inżynierii i ochrony środowiska z zakresu:

- Budownictwo zrównoważone, oddziaływanie na środowisko
- Inżynieria materiałów budowlanych, zagospodarowanie odpadów w budownictwie
- Projektowanie obiektów budowlanych, w tym rekonstrukcja i odnowa obiektów zabytkowych
- Trwałość i ochrona budynków i budowli, energooszczędność w budownictwie, niekonwencjonalne źródła energii
- Innowacyjne technologie budowy i eksploatacji obiektów budowlanych w budownictwie przemysłowym, hydro-technicznym, infrastrukturze komunalnej i transportowej
- Zagadnienia prawno-organizacyjne przygotowania i realizacji przedsięwzięć budowlanych

ADRES KOMITETU ORGANIZACYJNEGO

Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa
z dopiskiem: Konferencja PZITB - 2016
ul. Katowicka 48, 45-061 Opole
tel. +48 77 449 8575
email: konferencjapzitb2016@po.opole.pl
www: <http://www.kisipb.po.opole.pl>
(zakładka Konferencja PZITB – 2016)