

dr hab. inż. Paweł Lewiński, prof. nadzw. ITB¹⁾

Nowe rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne do sprężania oraz wzmacniania silosów i zbiorników

New materials and structural solutions for prestressing and strengthening of silos and tanks

DOI: 10.15199/33.2015.11.10

Streszczenie. W przypadkach stanów awaryjnych silosów i zbiorników żelbetowych często używaną metodą jest wzmacnianie obwodowe za pomocą cięgien lub prętów sprężających. Metody wzmacniania stosowane wcześniej zastąpiono nowymi technologiami o większej skuteczności i trwałości. Wprowadzone zostały nowe systemy kotwienia i nowe zabezpieczenia cięgien sprężających, a także nowe materiały do sprężania konstrukcji. W artykule przedstawiono aktualne kierunki rozwojowe omawianych technologii. Istota zmian polega m.in. na możliwości zastosowania cięgien odpornych na korozję, z kontrolowaną przyczepnością, na zastosowaniu zakotwień zblokowanych oraz na optymalizacji geometrycznej tras cięgien sprężających w strefie zakotwienia.

Słowa kluczowe: beton sprężony, cięgna, pręty sprężające, silosy żelbetowe, zbiorniki żelbetowe.

Abstract. Circumferential strengthening of RC or PC tanks and silos by using prestressing tendons or bars is a frequently used method. The hitherto methods were replaced by new technologies of increased efficiency and durability. There were introduced new systems and new methods of protection of prestressing tendons, as well as new materials for the prestressing of structures. The author of the paper had taken part in the implementation of these new technologies in Poland. The paper presents the current directions of development of the technologies involved. The essence of the changes is, inter alia, the application of corrosion resistant tendon, with the controlled bond, the use of interlocked anchors and geometric optimization of tendons routes in the anchorage zone.

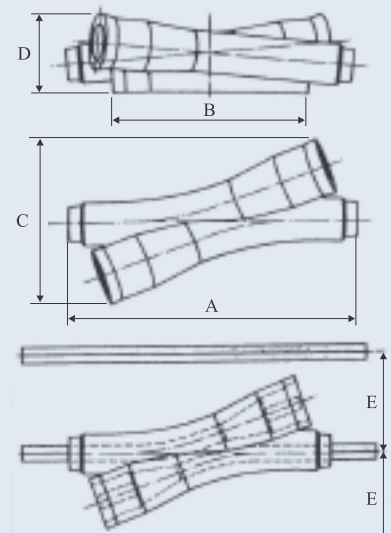
Keywords: prestressed concrete (PC), prestressing bars, reinforced concrete (RC) silos, RC tanks, tendons.

Wdrożenie współczesnych technologii wzmacniania silosów i zbiorników żelbetowych za pomocą cięgien bez przyczepności zostało poprzedzone realizacjami pilotażowymi w przypadkach zagrożeń konstrukcyjnych, przy których usunięciu konieczne było zastosowanie nowych technologii wzmacniania. Pierwsze doświadczenia ze stosowania omawianych technologii uzyskano w wyniku realizacji zaleceń ekspertyzy Instytutu Techniki Budowlanej opracowanej pod kierunkiem **prof. L. Runkiewicza** [5-9] w związku z awarią baterii silosów strunobetonowych do magazynowania cukru wzniesionych w połowie lat sześćdziesiątych XX wieku w Cukrowni Werbkowice. 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 cięgien i doprowadzeniu ich do poziomu stropu nad komorą. W 1995 r. zalecenia ekspertyzy zostały zrealizowane w odniesieniu do silosu nr 1, a w 1996 r. do silosu nr 2. Przykłady wzmacniania konstrukcji silo-

sów z wykorzystaniem niskotarciowego systemu sprężania z zakotwieniami typu X, to również opracowania ekspertów z Politechnik Krakowskiej, Wrocławskiej i Świętokrzyskiej [2, 3, 9], obejmujące m.in. wzmocnienie przez sprężenie: pięciu silosów na rzepak w NZPT S.A. w Brzegu (1996 r.); silosów w przedsiębiorstwie „Bolmar” Tłuszcze Roślinne w Bodaczowie (1998 r.); silosu nr 4 w Cukrowni Krasnostaw (1999 r.); silosów żelbetowych nr 2 i nr 4 w Zakładach Wapienniczych Lhoist S.A. w Bukowej (2007–2009), czy wzmocnienie cokołów silosów żelbetowych w Zakładach EWICO w Brzegu (2006 r.).

W zaleceniach opisanej ekspertyzy ITB wspomniano o kilku systemach wzmacniania silosów, ale niskotarciowy system sprężania (NSS) z wykorzystaniem zakotwień Freyssineta typu X został określony jako jeden z najbardziej racjonalnych. Po rozpatrzeniu przedłożonych ofert właściciel obiektu wybrał ten wariant realizacji, gdyż w pozostałych ofertach proponowano długie terminy wykonania wzmocnienia. Zaprojektowano wzmocnienie przewidujące zastosowanie 115 kabli sprężających typu Freyssineta (o sile po stratach reologicznych 160 kN w każdym). Ówczesny model

zakotwienia typu X pokazano na rysunku 1. Zastosowane kable o symbolu T15S (o powierzchni przekroju stali sprężają-



Rys. 1. Wcześniejszy model zakotwienia typu X. Poszczególne wymiary: A, B, C, D i E wynoszą odpowiednio: 280, 190, 160, 80 i 210 mm (lub 145 mm w przypadku specjalnego oprzyrządowania)

Fig. 1. The earlier model of X-type anchorage. The subsequent dimension A, B, C, D and E are 280, 190, 160, 80 and 210 mm (or 145 mm for special tooling), respectively

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej; Zakład Konstrukcji i Elementów Budowlanych
e-mail: p.lewinski@itb.pl

cej 150 mm²) miały siłę zrywającą 279 kN. Kable ułożono na całej wysokości komory silosu w zmiennym rozstawie, a następnie naciągnięto hydraulicznie, przy czym zaszła konieczność przeciągnięcia kabli przez otwory wykonane w ścianach wieży operacyjnej.

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 zaczynu cementowego;
- naciągnięciu kabli do siły określonej w projekcie;
- zakotwieniu kabli;
- wykonaniu zabezpieczenia antykorozyjnego zakotwień.

Usuwanie zagrożenia konstrukcyjnego, jakie wystąpiło w przypadku opisanej awarii baterii silosów na cukier, z zastosowaniem metod tradycyjnych byłoby kosztowne, skomplikowane i nie gwarantowałyby należytej trwałości. Niskotarciowy system sprężania jest efektywniejszy od tradycyjnego ze względu na obniżenie strat od tarcia na krzywiznie powłoki z 2/3 maksymalnej siły naciągu kabla do 18–19% tej wartości, przy zwiększonej odporności korozyjnej. Istotną sprawą jest też możliwość wyeliminowania pilastrów do kotwienia kabli przez zastosowanie zakotwienia krzyżowego typu X (rysunek 1), dzięki czemu wykonuje się tylko jedno zakotwienie na obwodzie, co zapewnia łatwość i krótki czas montażu oraz efektywną kontrolę naciągu kabli. Ważne było także to, aby przy wzmacnianiu cienkich powłok żelbetonowych, wcześniej sprężonych strunami i słabo zbrojonych zbrojeniem zwykłym, nie wprowadzać dodatkowego zginania od pilastrów w kierunku równoleżnikowym, na jakie powłoka nie była obliczona. Sploty używane do sprężania składają się z centralnego prostoliniowego drutu oraz sześciu obwodowych drutów spiralnych w osłonkach z tworzywa sztucznego HDPE i zabezpieczonych smarem na bazie oleju mineralnego. Kompletny ściąg wykonywany jest w wytwórni. Dodatkowym zabezpieczeniem jest zewnętrzna rura z tworzywa sztucznego wypełniona zaczynem cementowym, która zabezpiecza osłonki kabli przed uszkodzeniami mechanicznymi i zmniejsza docisk do powierzchni płaszcza.

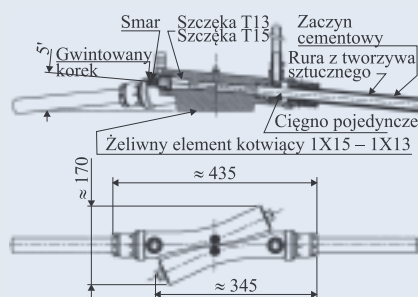
Zalecenia omawianej ekspertyzy ITB zostały zrealizowane, przy czym była to pierwsza w Polsce realizacja wzmocnienia konstrukcji powłoki silosu metodą NSS. To przedsięwzięcie stanowiło asumpt do zastosowania metody w przypadku naprawy wielu obiektów o podobnej konstrukcji. Na tym jednak nie poprzestano i po realizacji zaleceń ekspertyzy dotyczącej baterii silosów na cukier rozpoczęto rozłożony w czasie proces monitoringu systemów sprężenia w obiektach wzmocnionych z zastosowaniem nowych technologii [5, 6]. Fragmenty kabli sprężających typu Freyssineta pozostawiono celowo bez zabezpieczeń, aby umożliwić monitoring zakotwienia kabli sprężających i pomiary poślizgów cięgien. W wyniku prowadzonych wieloletnich kontroli stan techniczny wszystkich kabli bezprzyczepnościowych (wraz z ich blokami kotwiącymi), wzmacniających silosy na cukier i inne materiały sypkie oraz zbiorniki na ciecze, oceniono pozytywnie. Dwudziestoletnie monitorowanie opisanych wzmocnień silosów na cukier potwierdziło również ich trwałość i niezawodność.

Postęp w technologii wzmacniania konstrukcji silosów i zbiorników

Modernizacja systemu NSS. Od czasu wdrożenia systemu NSS w 1995 r. przebiegł on pewną ewolucję, ale zasadnicza idea nie uległa zmianie i tego typu wzmocnienia okazały się skuteczne. Zakotwienie cięgien obwodowych Freyssineta typu X składa się obecnie z odlewu z żeliwa sferoidalnego, opartego na konstrukcji osiowo-symetrycznej, służącego do kotwienia obu końcówek jednego lub dwóch cięgien o promieniu do 27,5 m:

■ zakotwienie 1X stosowane jest przy wykonywaniu jednej obejmy ściągającej (rysunek 2);

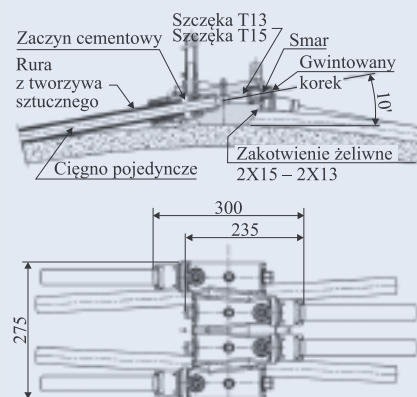
■ zakotwienie 2X stosowane jest do zakotwienia dwóch obejm ściągających, każ-



Rys. 2. Nowy model zakotwienia typu X – zakotwienie A 1X 13/15 (ciągno pojedyncze)
Fig. 2. The new model of X-anchorage – A 1X 13/15 monostrand anchor

da owinięta raz lub dwukrotnie wokół konstrukcji (rysunek 3) [10].

Żeliwo sferoidalne ma dobre właściwości wytrzymałościowe i poślizgowe. Może ulegać odkształceniu bez uszkodzeń, jest odporne na ściskanie i zginanie oraz na duże ciśnienie. Na rysunku 2 pokazano element kotwiący kable Freyssineta typu A 1X13 – A 1X15 służący do kotwienia splotów pojedynczych z indywidualnym zabezpieczeniem antykorozyjnym. Pętle cięgien sprężane są jednocześnie na obu końcach za pomocą jednosplotowych pras naciągowych. Rysunek 3 przedstawia element kotwiący kable Freyssineta typu A 2X13 – A 2X15 służący do kotwienia dwóch obejm ściągających w postaci pojedynczych splotów z indywidualnym zabezpieczeniem antykorozyjnym. W Aprobacie ETA [10] zamieszczono ponadto rysunki złączek adaptacyjnych do prasy jednosplotowej do zakotwień 1X13 – 1X15 oraz 2X13 – 2X15 (odpowiednio rysunki 55 i 56), przedstawiające także sposoby wykonania sprężenia przy użyciu dwóch (rysunek 55) oraz czterech (rysunek 56) pras M23 (SC2) do splotów pojedynczych. Konieczność zastosowania zewnętrznych



Rys. 3. Zakotwienie A 2X13 – A 2X15 i podwójne zakotwienie cięgien

Fig. 3. A 2X13 – A 2X15 anchorage and double anchoring of tendans

rur 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 szczęk kotwiących przed korozją. Uzyskano to przez 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 wo-

doszczelność 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, zakotwień zablokowanych oraz na optymalizacji geometrycznej tras cięgien sprężających w strefie zakotwienia. Kierunek rozwoju polega na podnoszeniu efektywności sprężenia przez obniżanie strat siły sprężającej, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwie równomiernego docisku radialnego cięgien sprężających do ściany silosu lub zbiornika.

Dąży się także do zapewnienia jak największej trwałości rozwiązania konstrukcyjnego z równoczesnym zmniejszeniem ciężaru wzmocnienia.

Inne technologie wzmocnienia przez wstępne sprężenie cięgnami bez przyczepności

W przypadku zarysowanego i nieszczelnego zbiornika wielokomorowego, opisanego w [5], 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 jednosplotowych bez przyczepności o niskiej relaksacji systemu BBR w osłonkach HDPE wypełnionych smarem. Zastosowano kable o wytrzymałości na rozciąganie (podobnie jak w poprzednim przypadku) 1860 MPa. Zakotwiono je w stalowych blokach kotwiących umiejscowionych w narożach komór osadnika wstępnego. Na niektórych odcinkach zastosowano ponadto dewiatory kierunkowe w celu eliminacji nadmiernych naprężeń rozciągających na powierzchniach zewnętrznych. Poszczególne ściany sprężono 30 lub 36 kablami. Podobne technologie wzmocnienia stosowane są także z wykorzystaniem takich systemów, jak np. BBV, MK4.

Sterowanie przyczepnością cięgien sprężających

Przyjęcie systemu przyczepnościowego lub bezprzyczepnościowego zależy od wielu czynników. W sytuacjach projektowych, w których wymagane jest np.: powtórne przeprowadzenie naciągu; pozostawienie możliwości wymiany kabla oraz kontrolowanie siły w kablu sprężającym, konieczne jest zastosowanie systemu bezprzyczepnościowego.

Nie jest to jednak obligatoryjne, gdyż 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 bezprzyczepnościowych 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.

W związku z występowaniem znacznych strat siły sprężającej spowodowanych tarcieniem na krzywiźnie wypracowano dwie zasadnicze koncepcje cięgien sprężających ze zmienną przyczepnością:

- zmianę przyczepności zapewnia opóźnienie czasu wiązania zaczynu iniekcyjnego [11];

- 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 [4] jest zapewnienie szczelnej otuliny cięgna w konstrukcji z betonu sprężonego, tak że nie zachodzi konieczność iniektowania zaczynu do osłonki kablowej. Gwarantowana 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.

Wnioski

Dotychczasowe wieloletnie doświadczenia i monitorowanie wzmocnień zbiorników oraz silosów żelbetowych potwierdzają zasadność i poprawność stosowania technologii wzmocnień do praktyki w ostatnich dwudziestu latach. Wdrożenie nowych technologii powinno być poprzedzone badaniami laboratoryjnymi i realizacjami pilotażowymi. Stosowanie pełnej przyczepności cięgien, nawet uzyskiwanej 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 cięgnie. Należałoby przeanalizować doświadczalnie, czy spowodowane wzrostem temperatury i zwiększoną relaksacją straty siły sprężającej nie przekraczałyby redukcji strat siły sprężającej spowodowanych tarcieniem na krzywiźnie. Tak więc wprowadzenie wszelkich tego rodzaju innowacji technologicznych wymaga wielu badań i analiz w laboratoriach akredytowanych.

Literatura

- [1] PN-EN 1992-3: 2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze.
- [2] Dyduch K., Kamiński M., Mrozowicz J., Wzmocnienie silosów żelbetowych poprzez sprężenie cięgnami zewnętrznymi, niskotarciowymi, Konferencja Naukowo-Techniczna Awaria Budowlane, Międzyzdroje, str. 217 – 224, 1997.
- [3] Dyduch K., Płachecki 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.
- [4] Hirohata T., Ohgaki Y., Takagaki T., Yoshioka T., Kiyosu K., Touda Y., Epoxy resin and a moisture-curing type curing agent; applied to the surface of a tendon used in a post-tensioning system for prestressed concrete, US Patent No. 6,623,558, 2003.
- [5] Runkiewicz L., Lewiński P., Diagnostyka, wzmocnianie i monitorowanie żelbetowych i sprężonych zbiorników na materiały sypkie i ciecze, Przegląd Budowlany, s. 25 – 32, nr 10/2014.
- [6] Runkiewicz L., Lewiński P., Monitorowanie żelbetowych zbiorników i silosów po wzmocnieniu, XIII Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztat Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego, Kielce – Cedyzna, 21- 23 maja 2014 roku, Wyd. ZG PZITB, s. 344 – 363, Warszawa, 2014.
- [7] Runkiewicz L., Lewiński P. 1995, „Niektóre zagadnienia modernizacji konstrukcji zbiorników żelbetowych związane z poprawą warunków ochrony środowiska”, Inżynieria i Budownictwo, Nr 12, s. 664 – 667.
- [8] Runkiewicz L., Lewiński P., Stany awaryjne silosów sprężonych i sposoby ich wzmocnienia, Przegląd Budowlany, str. 21 – 23 i str. 35, nr 1/1997.
- [9] 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, Ofic. Wyd. PWr, s. 177 – 184, Wrocław, 2000.
- [10] System Freyssinet do sprężania konstrukcji, Europejska Aprobata Techniczna nr ETA-06/0226, EOTA Europejska Organizacja ds. Aprobata Technicznych, Bruksela, 2012.
- [11] Xia C., Zhou H. M., Jin L. Z., Liu Y. Q., Duan S. F., Experimental and Theoretical Analysis on Carrying Capacity and Deflection of Bond-Retarded Prestressed Concrete Continuous Beams, Advanced Materials Research, Vol. 243 – 249, pp. 903 – 907, May 2011.

Przyjęto do druku: 21.09.2015 r.