

mgr inż. Lesław Hebda*

Aktywne metody wzmocniania i zabezpieczania konstrukcji żelbetowych

Active methods of reinforced concrete structures protection and strengthen

Konstrukcje żelbetowe są wzmocniane ze względu na zmianę sposobu użytkowania, błędy projektowe, degradację wskutek korozji lub uszkodzenia w wyniku nieprawidłowej eksploatacji. Do wyboru są pasywne lub aktywne metody wzmocnienia. **Sięgając po pasywny sposób wzmocnienia** polegający na zwiększeniu przekroju przez dobetonowanie, dodatkowe podparcie elementami stalowymi lub przyklejanie zbrojenia w postaci taśm lub siatek z włókna węglowego, należy sobie zdawać sprawę, iż wzmocnienie zacznie pracować, dopiero gdy wystąpi dodatkowe odkształcenie, co jednocześnie może wywołać przeciążenie wzmocnianych elementów. **Wzmocnienie aktywne** pozwala w pełni wykorzystywać właściwości elementów, wprowadzając do nich siły przeciwdziałające siłom wewnętrznym. Jest bardziej atrakcyjne cenowo od wzmocnienia pasywnego. Zdaniem prof. S. Kusia *We wszystkich przypadkach, gdy strefa rozciągana jest przyczyną postępowania wzmocniającego, sprężenie jest najbardziej efektywnym postępowaniem.* Podobna sytuacja występuje przy zabezpieczeniu antykorozyjnym, gdzie zabezpieczenie aktywne mimo większych kosztów początkowych pozwala nie tylko zatrzymać procesy korozji, ale i w niektórych przypadkach je odwrócić.

Doprężenie jako aktywny sposób wzmocnienia konstrukcji żelbetowej

W wyniku różnych czynników, np. błędów projektowych, wykonawczych, zmiany sposobu użytkowania, zmiany schematu statycznego w konstrukcjach żelbetowych mogą ujawniać się niebezpieczne układy sił od obciążeń zewnętrznych, powodujące przekroczenie dopuszczalnych naprężeń oraz

zarysowania. Aktywnym sposobem wzmocnienia jest dodatkowe sprężenie konstrukcji żelbetowej, które wprowadza w niej wstępny układ sił wewnętrznych, przeciwdziałający niebezpiecznemu układowi sił od obciążeń zewnętrznych w taki sposób, że łączne oddziaływanie tych układów konstrukcja przeniesie bezpiecznie [1]. Sprężanie konstrukcji żelbetowych często stosować na szeroką skalę, głównie w przypadku nowo wznoszonych obiektów inżynierskich. Bardzo rzadko sięga się po tę metodę jako technologię wzmocniania konstrukcji w przypadku remontów czy modernizacji. W świadomości wielu projektantów i wykonawców pokutuje przekonanie, że jest to technologia skomplikowana, a przede wszystkim droga. Wymaga wiedzy, specjalistycznego sprzętu, doświadczonych pracowników, jednak koszty jej realizacji nie zawsze są względnie wysokie.

Stronę ekonomiczną dodatkowego sprężenia przeanalizowano na przykładzie **cyldrycznego zbiornika żelbetowego na wodę technologiczną**, który wymagał wzmocnienia i uszczelnienia [2]. Analizowano trzy warianty wzmocnienia:

■ **wariant I:** nałożenie na powierzchnię zewnętrznej zbiornika dodatkowej siatki zbrojeniowej z prętów poziomych średnicy 16 mm co 8 cm i pionowych średnicy 12 mm w rozstawie co 15 cm; narzucenie torkretu; uszczelnienie iniekcyjne pionowych rys; wykonanie od wewnątrz powłoki izolacyjnej;

■ **wariant II:** dozbrojenie zbiornika taśmami z włókna węglowego mocowanymi na powierzchni zewnętrznej; 17 opasek z taśmy z włókna węglowego szerokości 100 mm i grubości 1,4 mm; osłonięcie taśm tynkiem cementowym; uszczelnienie iniekcyjne pionowych rys; wykonanie od wewnątrz powłoki izolacyjnej;

■ **wariant III:** sprężenie zbiornika belkami obwodowymi z zakotwieniami ty-

pu X z zastosowaniem cięgien średnicy 15,7 mm w rozstawie co 33 cm; wykonanie od wewnątrz powłoki izolacyjnej.

Najtańsze okazało się doprężenie zbiornika (tabela 1). W analizie kosztów pominięto rusztowania zewnętrzne oraz ułożenie powłoki izolacyjnej od wewnątrz.

Tabela 1. Analiza kosztów [2] wzmocnienia i uszczelnienia cylindrycznego zbiornika żelbetowego

Wariant	Cena netto [tys. zł]	Współczynnik
I	96,5	1,4
II	274,4	4
III	68,6	1

Innym przykładem zastosowania sprężenia jest **naprawa i wzmocnienie wiaduktu drogowego z prefabrykowanych belek strunobetonowych**, w przypadku którego w 2007 r. jedna ze skrajnych belek została uszkodzona przez ramię przewożonej koparki. Zerwano co najmniej 4 sploty sprężające w belce. Naprawa polegała na reprofiliacji betonu i naklejeniu na dolnej powierzchni belki taśm z włókna węglowego. W dość krótkim czasie taśmy te zostały zerwane (fotografia 1) przez samochód ciężarowy. W 2012 r. została uszkodzona druga belka skrajna wiaduktu, przy czym zerwany zo-



Fot. 1. Miejsce naprawy pierwszego uszkodzenia i zerwania wzmocniających taśm z włókna węglowego na pierwszej skrajnej belce

* Freyssinet Polska Sp. z o.o.

stał przynajmniej 1 splot sprężający. Ogłaszając przetarg na naprawę wiaduktu na zasadzie zaprojektuj i wykonaj, zamawiający początkowo skłaniał się ku powtórzeniu sposobu naprawy. Ostatecznie zastosowano lokalne, w miejscach uszkodzeń, doprężenia belek za pomocą prętów sprężających Freyssibar (fotografia 2). Przyjęte rozwiązanie okazało się tańsze od wzmacniania przez podklejenie taśm z włókna węglowego i pozwoliło na powtórne wprowadzenie siły sprężającej utraconej w wyniku przerwania ciągu sprężającego.



Fot. 2. Pręty sprężające Freyssibar zamontowane na uszkodzonych belkach skrajnych

Kolejnym przykładem zastosowania techniki sprężania w pracach remontowych jest **wymiana stropu nad piwnicami w jednej z warszawskich przedwojennych kamienic**. Pierwotna dokumentacja remontowa zakładała rozebranie istniejącej, skorodowanej płyty Kleina, opartej na ścianach budynku i środkowej ścianie nośnej i zastosowanie klasycznej płyty żelbetowej grubości 20 cm na ruszcie żelbetowym, oddylatowanej od budynku i posadowionej na słupach oraz środkowej, ciągłej ścianie nośnej (rysunek 1). Zastąpienie płyty na ruszcie sprężoną płytą pełną grubości 35 cm pozwoliło na wyeliminowanie ściany wsporczej w środku rozpiętości konstrukcji i uzyskanie otwartej przestrzeni w piwnicy (rysunek 2).

Nie w każdym przypadku sprężenie czy doprężenie wzmacnianej konstrukcji jest rozwiązaniem najbardziej efektywnym. W przypadku garażu pod-

ziemnego w Warszawie (fotografia 3) najprostszym i najszybszym rozwiązaniem wzmocnienia prostych słupów konstrukcyjnych okazało się zastosowanie profili stalowych.



Fot. 3. Wzmocnienie słupów garażu podziemnego za pomocą kształtowników stalowych zrealizowane przez Freyssinet Polska w Warszawie w 2013 r.

Ochrona katodowa jako aktywny sposób zabezpieczenia stali zbrojeniowej

W przypadku korozji prętów zbrojeniowych naprawa polega na miejscowym usunięciu skorodowanego betonu, oczyszczeniu odsłoniętego zbrojenia, zabezpieczeniu go powłoką antykorozyjną i reprofiliacji konstrukcji, najczęściej za pomocą zapraw typu PCC nakładanych ręcznie lub natryskowo, zgodnie z wytycznymi normy [3]. W analizach często pomijany jest przebieg procesu korozji stali zbrojeniowej. Po zniszczeniu warstwy pasywującej, na powierzchni stali powstają obszary o różnych potencjałach pomiędzy metalem a elektrolitem, który tworzy ciecz porową w betonie. Powstają lokalne ogniwa korozyjne, składające się z punktowych anod i katod. Procesy korozyjne są bardziej widoczne na anodzie. Po dokonaniu w takim miejscu punktowej naprawy z zabezpieczeniem stali łącznie, następuje odwrócenie biegunów w ogniwie i tuż obok naprawionego miejsca pojawia się dalsza destrukcja. Problem ten można wyeliminować, zastępując bierną, odcinkową ochronę powłokową

stali zbrojeniowej, **aktywną ochroną, tzw. katodową**. Stosowanie tej metody jest uzasadnione w przypadku konstrukcji narażonych na intensywne oddziaływanie czynników korozyjnych, zwłaszcza chlorków. Należą do nich: **infrastruktura na nabrzeżach morskich, mosty i wiadukty drogowe, specyficzne obiekty produkcyjne**.

Warunkiem funkcjonowania ochrony katodowej jest zachowanie ciągłości zbrojenia w konstrukcji przez spawanie, zgrzewanie lub bardzo dokładne skręcenie. Ochrona katodowa jest odmiennie realizowana w przypadku konstrukcji podziemnych i podwodnych, gdzie anody są umieszczone w środowisku elektrolitycznym, w odpowiednim oddaleniu. W przypadku konstrukcji żelbetowych stykających się z atmosferą, anody muszą bezpośrednio stykać się z betonem, być na jego powierzchni lub w głębi, gdyż środowiskiem elektrolitycznym jest ciecz porowa betonu.

Stosowanie w praktyce ochrony katodowej wymaga interdyscyplinarnej wiedzy i dlatego personel powinien mieć odpowiednie kompetencje, których weryfikacja jest ujęta normowo [6; 12].

Obecnie na rynku dostępne są rozwiązania systemowe [7]:

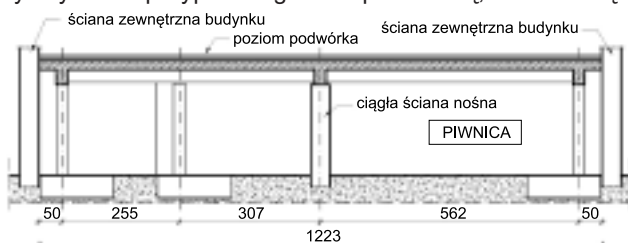
■ **ochrona galwaniczna** (stosowana w przypadku małej intensywności oddziaływania czynników korozyjnych):

– powłoki cynkowe natryskiwane na gorąco na powierzchnię betonu i punktowo łączone ze zbrojeniem;

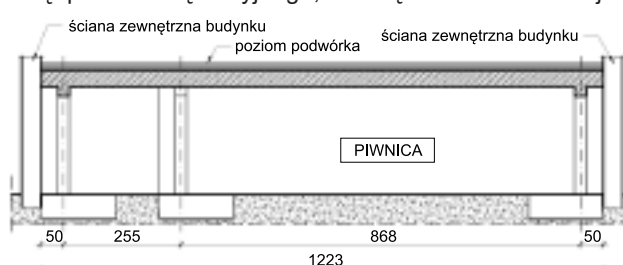
– anody tracone umieszczane w powierzchniowych bruzdach, w pobliżu zbrojenia;

■ **ochrona katodowa**:

– powierzchniowe siatki metalowe stanowiące katodę, pokryte 2 – 3 warstwami torkretu, pokrywają powierzchnię chronionego elementu konstrukcyjnego; rozwiązanie stosowane jest



Rys. 1. Pierwotny projekt wymiany płyty stropowej piwnicy w obszarze podwórka z klasyczną płytą na ruszcie opartym na słupach i wewnętrznej ścianie nośnej



Rys. 2. Rozwiązanie alternatywne z płytą stropową sprężoną, które pozwala na likwidację wewnętrznej ściany nośnej

w przypadku silnie skarbonatyzowanych konstrukcji istniejących i z dużą zawartością chlorków, w których strefa skażenia nie dotarła jeszcze do stali zbrojeniowej;

- pasy z siatek tytanowych umieszczane w bruzdach na powierzchni betonu, w sąsiedztwie prętów zbrojeniowych; system ten może być stosowany również w nowych konstrukcjach przez umieszczenie katod ochronnych na zbrojeniu, przed betonowaniem;

- wewnętrzne, dyskretne anody tytanowe umieszczane w otworach lub bruzdach powierzchniowych, w sąsiedztwie zbrojenia; stosowane w przypadku silnie zbrojonych konstrukcji; umożliwia również ochronę zbrojenia ułożonego głębiej;

- anody malowane organiczną farbą przewodzącą; mają zastosowanie w przypadku małej intensywności oddziaływania czynników korozyjnych, a ponadto sama powłoka ma ograniczony czas życia, nieprzekraczający 10 lat.

Ochrona katodowa zbrojenia wykorzystuje procesy elektrochemiczne, które znajdują również zastosowanie w zabiegach prewencyjnych, polegających na realkalizacji betonu i usuwaniu chlorków z betonu, co pozwala na utrzymanie w dłuższym czasie stanu pasywacji stali zbrojeniowej przez regenerację otuliny betonowej, nim strefa skażenia dotrze do prętów. W ostatnich latach metody te wyszły poza laboratoryjną czy półtechniczną skalę zastosowań i stały się kolejną dostępną techniką naprawy betonu [6, 7].

Realkalizację otuliny betonowej, czyli przywracanie wysokiej wartości pH w betonie („odkwaszenie” betonu) można przeprowadzić dwiema metodami. **Metoda elektrochemiczna** polega na krótkotrwałym przepływie prądu pomiędzy zbrojeniem (katodą) a anodą umieszczoną w „okładzie”, nasączonym alkalicznym roztworem elektrolitu, ułożonym na powierzchni betonu. Łączny ładunek prądu powinien wynosić ok. 200 Ah/m² zbrojenia [8, 9]. Skuteczność elektrochemicznych zabiegów realkalizacji betonu wielokrotnie została potwierdzana badaniami laboratoryjnymi [9]. Realkalizację można też przeprowadzać, wykorzystując zjawisko dyfuzji jonów pomiędzy „okładem” wysyconym roztworem jonów węglanowych i hydroksylowych,

umieszczonym na powierzchni betonu, a otuliną betonową zbrojenia. Wykorzystując mechanizm działania elektrochemicznej metody realkalizacji betonu, można usunąć z niego wolne jony chlorowe do dopuszczalnego poziomu ich zawartości (< 0,4% masy cementu) i jony innych szkodliwych soli. Przy ekstrakcji chlorków z betonu stosuje się możliwe wysokie napięcia źródła zasilania, 30 – 40 V. Czas procesu, szczególnie przy silnym zasoleniu, może dochodzić do kilku tygodni.

Systemy ochrony katodowej zostały zainstalowane w wielu obiektach na terenie Wielkiej Brytanii i Irlandii, m.in. na wiadukcie na drodze A1089 w miejscowości Tilbury (2008) oraz basenie pływakim Forum w Billingham (2011). Metodę elektrochemiczną zastosowano też w przypadku naprawy 17 filarów wybudowanego w 1973 r. budynku **Monte Carlo Star w Monako** [10] usytuowanego na nabrzeżu Morza Śródziemnego. Po ok. 30 latach eksploatacji, w 2005 r., stwierdzono na filarach znaczne uszkodzenia korozyjne. Przed planowaną modernizacją obiektu przeprowadzono naprawę obejmującą, oprócz klasycznej reprofiliacji betonu, dwa zabiegi wykorzystujące procesy elektrochemiczne. Pierwszy z nich polegał na ekstrakcji chlorków z betonu i został przeprowadzony w ciągu 21 dni z zastosowaniem systemu „Foreva Regebeton PA”. W zależności od miejsca stwierdzono zmniejszenie zawartości chlorków o 40 ÷ 97%. Drugi zabieg polegał na zainstalowaniu stałej ochrony katodowej w systemie „Foreva CP Mesh” – obłożeniu naprawianych filarów siatką ze stabilizowanego tytanu i podłączeniu jej do źródła prądu stałego. Siatka została pokryta torkretem. Do tego samego źródła prądu podłączono też zbrojenie w filarach. Prąd maksymalnej gęstości 20 mA/m² pozwoli uzyskać w stali stały potencjał elektrochemiczny blokujący rozwój korozji.

Dotychczas w Polsce nie zamontowano ani jednej instalacji ochrony katodowej konstrukcji żelbetowej. Doświadczalną anodę zainstalowano jedynie na jednej z **podpór Trasy Łazienkowskiej w Warszawie** w ramach realizacji projektu badawczego ARCHES, stanowiącego element 6. Programu Ramowego UE dotyczącego mobilności, transportu i bezpieczeństwa [11].

Streszczenie

W artykule przedstawiono aktywne metody wzmacniania konstrukcji żelbetowych przez dodatkowe sprężenie. W pewnych warunkach to metoda wzmacniania najtańsza. Innym aktywnym sposobem zabezpieczenia konstrukcji żelbetowych jest ochrona katodowa prętów zbrojeniowych. Te metody wyszły poza sferę laboratoryjną i stały się obecnie normalnym narzędziem technicznym stosowanym w praktyce.

Abstract

The presents active methods of strengthening concrete structures by post tensioning with cables. Under certain conditions this method of reinforcement is the cheapest. The cathode protection of steel bars in concrete structure is another active method. These solution went out from laboratory level and they are regular technical tool now.

Literatura

- [1] Ajdukiewicz A., Mames J.: Konstrukcje z betonu sprężonego. Wydawnictwo Polski Cement. Kraków 2004.
- [2] Hebda L., Górski K., Piętko M.: Aktywne sposoby wzmacniania i zabezpieczenia konstrukcji żelbetowych. Przegląd Budowlany nr 4/2012.
- [3] PN-EN 1504-9:2010. Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 9: Ogólne zasady dotyczące stosowania wyrobów i systemów.
- [4] Czarnecki L., Emmons P.H.: Naprawa i Ochrona Konstrukcji Betonowych. Wydawnictwo Polski Cement. Kraków 2002.
- [5] PN-EN 12696:2004 Ochrona katodowa stali w betonie.
- [6] Controlling corrosion of concrete reinforcements. System Foreva.
- [7] Jaśniok M., Zybura A.: Zabezpieczenie i regeneracja zagrożonych korozją konstrukcji z betonu. Elektrochemiczne odtworzenie ochronnych właściwości otuliny betonowej (cz. IV). Przegląd Budowlany nr 7 – 8/2007.
- [8] Sokółski W.: Ochrona katodowa stali zbrojeniowej w betonie – aktualny stan technologii, zakres stosowania i wymagania normowe. Ochrona przed Korozją, vol. 54, nr 1/2011.
- [9] Jaśniok M., Zybura A.: Badania skuteczności zabiegu elektrochemicznej realkalizacji betonu. XLVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB. Opole – Krynica 2002.
- [10] Berramdane N., Mellier E., Tournier C.: Rehabilitation of Monte Carlo Star's piers. IABSE. Bankog 2009.
- [11] Wierzbicki T.: ARCHES. Ocena stanu i metody napraw drogowych obiektów inżynierskich w Europie Centralnej. Skróty Raportu Końcowego Projektu ARCHES. IBDiM, Warszawa, maj 2010.
- [12] PN-EN 15257:2008 Ochrona katodowa. Poziomy kompetencji i certyfikacja personelu ochrony katodowej.