

# Ochrona katodowa jako aktywny sposób zabezpieczenia konstrukcji żelbetowej

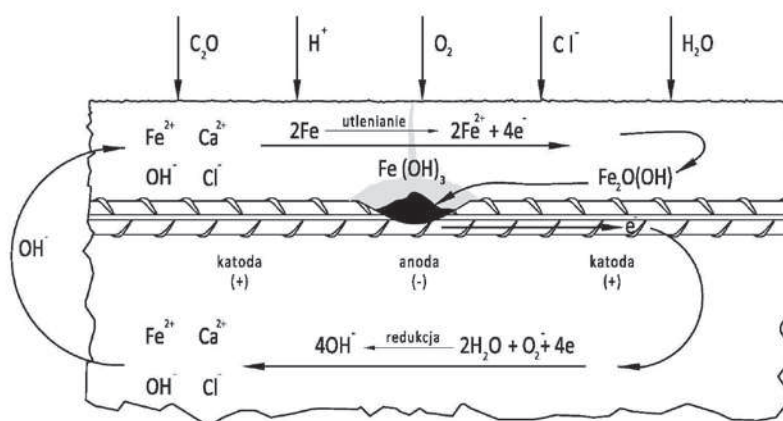
Dr inż. Lesław Hebda, mgr inż. Krzysztof Berger, Feryssinet Polska Sp. z o.o.

## 1. Wprowadzenie

W pracy przedstawiono skrótowo przebieg procesu korozji stali zbrojeniowej w betonie z uwzględnieniem reakcji elektrochemicznych na powierzchni stali. Omówiono metody ochrony katodowej, rozwiązania technologiczno-materiałowe stosowane w praktyce, wymagania stawiane w normach w odniesieniu do kompetencji personelu zajmującego się wykonywaniem instalacji ochrony katodowej. Przedstawiono prewencyjne zabiegi w stosunku do betonu, wykorzystujące procesy elektrochemiczne, a polegające na realkalizacji otuliny betonowej i ekstrakcji z niej jonów chlorkowych. Przytoczono też przykłady wykonania instalacji ochrony katodowej w różnych obiektach w latach 2005–2011.

## 2. Korozja stali zbrojeniowej w betonie

W nowych konstrukcjach betonowych pręty zbrojeniowe pokrywają się, przy wysokim pH otaczającego środowiska (betonu), bardzo cienką, dobrze przylegającą do powierzchni, szczelną i odporną chemicznie oraz przewodzącą prąd elektryczny warstwą tlenku żelaza  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  [1]. Z upływem czasu, w wyniku obniżenia pH (zakwaszenia) otaczającego betonu spowodowanego karbonatyzacją oraz dotarcia czynników korozyjnych bezpośrednio do stali zbrojeniowej w rezultacie uszkodzeń mechanicznych otuliny betonowej (np. zarysowania konstrukcji na skutek oddziaływania sił zewnętrznych czy korozji mrozowej) i dyfuzji, następuje depasywacja tej warstwy i rozpoczyna się proces korozji. Z chwilą wystąpienia



Rys. 1. Schemat przebiegu reakcji korozyjnych stali zbrojeniowej w betonie [2], [3]

tw. rdzy na powierzchni stali zbrojeniowej, konstrukcja żelbetowa wymaga naprawy, gdyż jej dalszy proces destrukcyjny będzie następował bardzo szybko.

Po zniszczeniu warstwy pasywującej, na powierzchni stali powstają obszary o różnych potencjałach pomiędzy metalem a elektrolitem, który stanowi ciecz porowa w betonie. Tworzą się lokalne ogniwa korozyjne składające się z punktowych anod i katod (rys. 2). Procesy korozyjne są bardziej widoczne na anodzie, następuje niszczenie stali i pojawia się rdza [2], [3].

W Polsce, zgodnie z normą [4], najczęściej dokonuje się wymiany skażonego lub skarbonatyzowanego betonu (zasada 7, metoda 7.2.) po uprzednim odstąpieniu i oczyszczeniu skorodowanej stali zbrojeniowej oraz pokryciu jej powłokami antykorozyjnymi na bazie cementowej lub żywic epoksydowych (zasada 11). Najczęściej są to naprawy miejscowe wykonywane w obszarach anodowych zbrojenia. Często, po wykonaniu miejscowej naprawy z zabezpieczeniem stali łącznie, następuje odwrócenie

biegunów w ogniwie przedstawionym na rysunku 1 i tuż obok naprawionego miejsca następuje dalsza destrukcja zbrojenia i otuliny. Problem ten można wyeliminować zastępując bierną, odcinkową ochronę powłokową stali zbrojeniowej, aktywną ochroną – katodową. Ma ona uzasadnienie tylko w konstrukcjach narażonych na intensywne oddziaływanie czynników korozyjnych, zwłaszcza jonów chlorkowych, gdy procesy korozyjne stali zbrojeniowej w betonie przebiegają znacznie szybciej [2].

## 3. Ochrona katodowa stali zbrojeniowej

Ochrona katodowa konstrukcji podziemnych i podwodnych polega na umieszczeniu anod dostarczających prąd ochronny w środowisku elektrolitycznym, w odpowiednim oddaleniu. W konstrukcjach żelbetowych stykających się z atmosferą, dostarczające prąd anody muszą być na powierzchni betonu lub w głębi, gdyż środowiskiem elektrolitycznym jest ciecz porowa betonu. Umożliwia ona przepływ prądu, wprowadzie ma-

tego, ale wystarczającego do wywołania polaryzacji elektrochemicznej [1]. Jako kryterium ochrony katodowej w żelbecie wykorzystuje się pomiar potencjału wyłączeniowego, tj. określonego w czasie od 0,1 do 1 sekundy po odłączeniu prądu ochrony katodowej, który powinien być bardziej ujemny niż  $-720$  mV względem chlorosrebrowej elektrody odniesienia i jednocześnie nie bardziej ujemny niż  $-1100$  mV, ze względu na występowanie kruchości wodorowej oraz wielkość depolaryzacji zbrojenia [1].

Ochrona katodowa konstrukcji żelbetowych w świecie i Europie przeszło 10 lat temu wyszła poza fazę naukowo-techniczną i stała się normalnym narzędziem zabezpieczenia konstrukcji, ujętym w zharmonizowanych normach europejskich [4], [5].

Jest to aktywna forma kreująca korzystne warunki środowiska wokół prętów i na ich powierzchni, dedykowana obiektom pracującym w bardzo trudnych warunkach środowiskowych, przede wszystkim narażonym na korozję chlorkową: całość infrastruktury na nabrzeżach morskich, mosty i wiadukty drogowe, specyficzne obiekty produkcyjne, infrastruktura podziemna oraz stykająca się z wodą morską i słodką, w tym wszelkiego rodzaju zbiorniki na wodę, w tym baseny pływakie.

W ostatnich kilkunastu latach w Polsce wybudowano bardzo dużo pływalni i basenów kąpielowych. We wszystkich, w mniejszym lub większym stopniu, związki chloru są wykorzystywane w procesach oczyszczania wody. W sporej części z tych obiektów występują lub występowały w przeszłości problemy ze szczelnością żelbetowych niecek basenowych. Uszczelnienia powłokowe i iniekcyjne są w stanie zablokować eksfiltrację wody, ale nie usuną chlorków, które zostały wprowadzone do betonu. Podwyższona wilgotność i temperatura sprzyjają rozwojowi procesów korozyjnych stali zbrojeniowej. Potencjalnie są to obiekty, w których zastosowanie ochrony katodowej jest technicznie zasadne. Podobnie jak zabiegi realkalizacyjne, usuwanie chlorków z otuliny betonowej może być zasadne w przypadku

płyt żelbetowych parkingów podziemnych. Są one narażone na okresowe oddziaływanie chlorków pochodzących ze środków do odładzania jezdni, zwłaszcza w przypadku oszczędnościowych rozwiązań w postaci utwardzanych i zacieranych posadzek betonowych.

Norma PN-EN 12696:2004 [5] obejmuje zagadnienia wykonania ochrony katodowej z pominięciem projektowania. Norma ta przewiduje zastosowanie systemów anodowych:

- a) z powłok organicznych przewodzących i metalowych, układanych na powierzchni betonu,
- b) ze stabilizowanego tytanu w formie powierzchniowych siatek, pasków ciągłych lub siatkowych umieszczanych w bruzdach wyciętych na powierzchni betonu oraz dyskretnych elektrod umieszczanych w bruzdach lub otworach w betonie.

Stosowanie ochrony katodowej, również ze względu na brak unormowań w zakresie projektowania, wymaga interdyscyplinarnej wiedzy, dlatego personel powinien mieć odpowiednie kompetencje, których weryfikacja jest również ujęta normowo [6]. W przywołanej normie oddzielnie są określone kompetencje personelu specjalizującego się w ochronie katodowej stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetowych. Dokument ten przewiduje 3 poziomy kompetencji personelu zajmującego się wykonywaniem ochrony katodowej. Weryfikacja kompetencji obejmuje wykonanie 35 zadań (czynności). Na pierwszym poziomie oczekuje się umiejętności wykonywania niezbędnych pomiarów, interpretacji wyników, korekt itp. Na tym poziomie należy wykazać umiejętność zrealizowania 25 wskazanych zadań spośród listy 35. Na drugim poziomie kompetencji wymaga się umiejętności zrealizowania 34 spośród 35 zadań. Na tym poziomie nie wymaga się umiejętności interpretacji wyników analizy chlorków.

Do tej pory w Polsce nie ma ani jednej wykonanej instalacji ochrony katodowej konstrukcji żelbetowej. Do założenia takiej instalacji przygotowany został most w Cieszynie. Samej instalacji jednak nie wykonano. Za-

instalowano jedynie doświadczalną anodę 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 [8]. W tej kwestii w Polsce nie zrobiono nic więcej. Nie ma szkoleń, nie ma ośrodka sprawdzającego kompetencje, nie ma osób certyfikowanych.

Obecnie na rynku europejskim dostępne są gotowe rozwiązania systemowe materiałowo-technologiczne w zakresie ochrony katodowej konstrukcji żelbetowych, obejmujące przykładowo [7]:

- 1) Ochronę galwaniczną w formie:
  - a) Powłoki cynkowej natryskiwanej na gorąco na powierzchnię betonu i punktowo łączącej ze zbrojeniem.
  - b) Anod traconych umieszczanych w powierzchniowych bruzdach, w pobliżu zbrojenia.
 Rozwiązania te stosowane są w przypadkach małej intensywności oddziaływania czynników korozyjnych
- 2) Ochronę katodową w formie:
  - a) Powierzchniowych siatek metalowych stanowiących katodę, pokrytych 2–3 warstwami tokretu. Siatkami pokrywa się całą powierzchnię chronionego elementu konstrukcyjnego. Rozwiązanie to ma zastosowanie w przypadku konstrukcji już istniejących, silnie skarbonatyzowanych i z dużą zawartością chlorków, w których strefa skażenia nie dotarła jeszcze do stali zbrojeniowej.
  - b) Pasów z siatek tytanowych umieszczanych w bruzdach na powierzchni betonu, w sąsiedztwie prętów zbrojeniowych. System ten może być stosowany również w nowych konstrukcjach poprzez umieszczenie katod ochronnych na zbrojeniu, przed betonowaniem.
  - c) Wewnętrznych, dyskretnych anod tytanowych umieszczanych w otworach lub bruzdach powierzchniowych, w sąsiedztwie zbrojenia. Rozwiązanie jest dedykowane silnie zbrojonym konstrukcjom i umożliwia również ochronę zbrojenia ułożonego głębiej.
  - d) Anod malowanych, do wykonania których stosuje się organiczne farby

przewodzące. Rozwiązanie to ma zastosowanie przy małej intensywności oddziaływania czynników korozyjnych, a ponadto sama powłoka ma ograniczony czas życia, nieprzekraczający 10 lat.

#### 4. Prewencyjne zabiegi elektrochemiczne

Ochrona katodowa zbrojenia wykorzystuje procesy elektrochemiczne, które znajdują również zastosowanie w zabiegach prewencyjnych, polegających na realkalizacji betonu i usuwaniu chlorków z betonu, pozwalających na utrzymanie w dłuższym przedziale czasowym stanu pasywacji stali zbrojeniowej poprzez regenerację otuliny betonowej w czasie zanim 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 [7], [9]. Na rynku dostępne są systemowe rozwiązania materiałowo-technologiczne dla zrealizowania takich zabiegów [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. Gęstość prądu realkalizacji nie powinna przekraczać  $4 \text{ A/m}^2$  powierzchni zbrojenia, zaś czas przebiegu procesu nie powinien być mniejszy niż 100 godzin. Łączny ładunek prądu powinien wynosić około  $200 \text{ Ah/m}^2$  zbrojenia [1]. Skuteczność elektrochemicznych zabiegów realkalizacji betonu była wielokrotnie potwierdzana w badaniach laboratoryjnych [10].

Realkalizację można też przeprowadzać wykorzystując zjawisko dyfuzji jonów pomiędzy „okładem”, nasączonym roztworem jonów węglanowych i hydroksyloowych i umieszczonym na powierzchni betonu, a otuliną betonową zbrojenia.

Wykorzystując mechanizm działania elektrochemicznej metody realkalizacji betonu, można też usunąć z betonu jony chlorkowe aż do dopuszczalnego poziomu ich stężenia. Ponadto stosuje się krótkotrwały przepływ prądu pomiędzy zbrojeniem (katodą) a anodą umieszczoną w „okładzie” ułożonym na powierzchni betonu i nasyconym odpowiednim elektrolicie. W ten sposób z otuliny betonowej można usunąć wolne jony chlorkowe aż do dopuszczalnego poziomu ich zawartości ( $< 0,4\%$  masy cementu) i również jony innych szkodliwych soli. Przy ekstrakcji chlorków z betonu stosuje się możliwie wysokie napięcia źródła zasilania, rzędu 30–40 V. Gęstość prądu nie powinna przekraczać, w dłuższym czasie, na powierzchni zbrojenia  $10 \text{ A/m}^2$ . Łączny ładunek prądu, w zależności od stanu początkowego zbrojenia, w całym procesie zawiera się w przedziale 1000–2000  $\text{Ah/m}^2$ . Czas trwania procesu, szczególnie przy silnym zasoleniu, może dochodzić do kilku tygodni.

#### 5. Przykłady realizacji

Systemy ochrony katodowej zostały zainstalowane w wielu obiektach na terenie Wielkiej Brytanii i Irlandii, między innymi w Custom House Docks w Dublinie w 2005 roku, w tym samym roku na terminalu South Hook w Milford Haven w południowej Walii oraz na parkingu wielopiętrowym w centrum Welwyn Garden City. W latach 2005–2007 ochrona katodowa została zainstalowana w pochodzącym z 1930 roku budynku Acton w Londynie. Kolejnymi przykładami są wiadukt na drodze A1089 w miejscowości Tilbury (2008) oraz basen pływakowy Forum w Billingham (2011).

Jednym z przykładów szerokiego zastosowania metod elektrochemicznych w renowacji konstrukcji żelbetowych jest naprawa 17 filarów budynku Monte Carlo Star w Monako [11]. Budynek ten, usytuowany na nabrzeżu Morza Śródziemnego w bezpośrednim sąsiedztwie portu jachtowego, został wybudowany w 1973 roku. Po blisko 30 latach eksploatacji, w 2005 roku 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. Został przeprowadzony w ciągu 21 dni przy zastosowaniu systemu „Foreva Regebeton PA”. Po zabiegu stwierdzono zmniejszenie się zawartości chlorków, w zależności od miejsca, w zakresie od 40 do 97%. Drugim zabiegiem było zainstalowanie stałej ochrony katodowej w systemie „Foreva CP Mesh”, polegającym na obłożeniu naprawianych filarów siatką ze stabilizowanego tytanu i podłączeniu jej do źródła prądu stałego. Siatka została pokryta torkretem, a drugim elementem podłączonym do tego samego źródła prądu było zbrojenie w filarach. Po podłączeniu prądu o maksymalnej gęstości  $20 \text{ mA/m}^2$  udało się uzyskać w stali stały potencjał elektrochemiczny blokujący rozwój korozji.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Sokółski W., Ochrona katodowa stali zbrojeniowej w betonie – aktualny stan technologii, zakres stosowania i wymagania normowe. Ochrona przed Korozją, vol. 54, nr 1/2011
- [2] Czarnecki L., Emmons P. H., Naprawa i Ochrona Konstrukcji Betonowych. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2002
- [3] Gruener M., Korozja i ochrona betonu. Arkady, Warszawa 1983
- [4] 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
- [5] PN-EN 12696:2004 Ochrona katodowa stali w betonie
- [6] PN-EN 15257: 2008 Ochrona katodowa. Poziomy kompetencji i certyfikacja personelu ochrony katodowej
- [7] Controlling corrosion of concrete reinforcements. System Foreva
- [8] Wierzbicki T., ARCHES. Ocena stanu i metody napraw drogowych obiektów inżynierskich w Europie Centralnej. Skrót Raportu Końcowego Projektu ARCHES. IBDiM, Warszawa, maj 2010
- [9] 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
- [10] Jaśniok M., Zybura A., Badania skuteczności zabiegu elektrochemicznej realkalizacji betonu. XLVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB. Opole – Krynica 2002
- [11] Berramdan N., Mellier E., Tourneur C., Rehabilitation of Monte Carlo Star's piers. IABSE, Bangkok 2009