

# Aktywne metody ochrony konstrukcji żelbetowych. Elektrochemiczna ochrona zbrojenia przed korozją

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

## 1. Metody zabezpieczenia antykorozyjnego stali zbrojeniowej w konstrukcjach betonowych

W nowych konstrukcjach żelbetowych zabezpieczenie antykorozyjne zbrojenia jest realizowane przez wykorzystanie zjawiska polegającego na pokrywaniu się prętów stalowych, przy wysokim pH otaczającego środowiska (betonu), bardzo cienką, dobrze przylegającą do powierzchni, szczelną i odporną chemicznie oraz przewodzącą prąd elektryczny warstwą tlenku  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  [1]. Zagrożeniem dla tego procesu są zjawiska destrukcyjne:

- obniżenie pH (zakwaszenie) otaczającego betonu wskutek procesu karbonatyzacji,
- dotarcie czynników korozyjnych bezpośrednio do stali zbrojeniowej na skutek uszkodzeń mechanicznych otuliny betonowej (np. zarysowania konstrukcji na skutek oddziaływania sił zewnętrznych czy korozji mroźowej).

Z chwilą wystąpienia tzw. rdzy na powierzchni stali zbrojeniowej, konstrukcja żelbetowa wymaga naprawy, gdyż jej dalszy proces destrukcyjny, zgodnie z dobrze znanym mechanizmem będzie następował bardzo szybko.

Europejska zharmonizowana norma dotycząca wyrobów i systemów ochrony i naprawy konstrukcji betonowych [5] za najistotniejsze przyczyny korozji zbrojenia uznaje karbonatyzację betonu, korozyjne oddziaływanie chlorków, innych halogenków niż chlorki oraz innych chemikaliów rozpuszczalnych w wodzie. Cytowana norma przewiduje kilka zasad i metod zabezpieczenia konstrukcji żelbetowej i jej ewentualnej naprawy:

- zwiększenie grubości otuliny przez dodanie zaprawy lub betonu (zasada 7, metoda 7.1.),
- wymiana skażonego lub skarbonatyzowanego betonu (zasada 7, metoda 7.2.),
- elektrochemiczna realkalizacja skarbonatyzowanego betonu (zasada 7, metoda 7.3.),
- realkalizacja skarbonatyzowanego betonu przez dyfuzję (zasada 7, metoda 7.4.),
- elektrochemiczne usunięcie chlorków (zasada 7, metoda 7.5.),
- podwyższenie oporności elektrycznej otuliny (zasada 8),

- kontrola obszarów katodowych (zasada 9),
- ochrona katodowa (zasada 10),
- kontrola obszarów anodowych (zasada 11).

W Polsce wykorzystywane są metody 7.1. i 7.2 oraz zasady 8, 9 i 11. Ostatnia zasada polega na pokrywaniu odsłoniętej i oczyszczonej z produktów korozji stali zbrojeniowej powłokami antykorozyjnymi na bazie cementowej lub żywic epoksydowych. Wszelkie metody i zasady wykorzystujące zjawiska elektrochemiczne do ochrony prętów w konstrukcjach nie znalazły do tej pory uznania na polskim rynku. Zasada 8 sprowadza się do osuszenia betonu, a zasada 9 – do ograniczenia dostępu tlenu do wszystkich potencjalnych obszarów katodowych.

## 2. Elektrochemiczne zabezpieczenie stali zbrojeniowej

Pośród wymienionych w pkt. 1. zasad i metod ochrony zbrojenia, metody 7.3–7.5 oraz zasadę 10 można potraktować wspólnie jako wykorzystujące zjawiska elektrochemiczne. Metody polegające na realkalizacji betonu i usuwaniu chlorków z betonu należy zaliczyć do zabiegów prewencyjnych, pozwalających na utrzymanie w dłuższym przedziale czasowym stanu pasywacji stali zbrojeniowej poprzez regenerację otuliny betonowej w czasie zanim strefa skażenia dotrze do stali zbrojeniowej. W ostatnich latach metody te wyszły poza laboratoryjną czy półtechniczną skalę zastosowań i stały się kolejną dostępną techniką naprawy betonu [8, 9]. Na rynku dostępne są systemowe rozwiązania materiałowo-technologiczne dla zrealizowania takich zabiegów [8].

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 Ah/m<sup>2</sup> zbrojenia [1]. Skuteczność elektrochemicznych zabiegów realkalizacji betonu była wielokrotnie potwierdzana w badaniach laboratoryjnych [4].

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

Wykorzystując mechanizm działania elektrochemicznej metody realkalizacji betonu, można też usunąć z betonu jony chlorkowe. Stosuje się wówczas krótkotrwały przepływ prądu pomiędzy zbrojeniem (katodą) a anodą umieszczoną w „okładzie” ułożonym na powierzchni betonu i nasyconym odpowiednim elektrolitem. 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 A/m<sup>2</sup>. Łączny ładunek prądu, w zależności od stanu początkowego zbrojenia, w całym procesie zawiera się w przedziale 1000–2000 Ah/m<sup>2</sup>. Czas trwania procesu, szczególnie przy silnym zasoleniu, może dochodzić do kilku tygodni.

W warunkach zawilgocenia otuliny betonowej (wilgotność optymalna dla rozwoju procesu to 60% wilgotności względnej), docierające z powietrza tlen i dwutlenek węgla reagują z wodorotlenkiem wapnia, zawartym w betonie, w głównej mierze odpowiedzialnym za zasadowość betonu. W efekcie powstaje obojętny węglan wapnia, który doszczelnia strukturę betonu, i woda. Konsekwencją tej reakcji jest stopniowe obniżanie się pH betonu. Gdy jego wartość spadnie poniżej 11 [2] czy też 9 [3], to powierzchniowa warstwa pasywująca z tlenku żelazowego ulega degradacji, następuje aktywacja stali i rozwijają się procesy korozyjne.

Z chwilą pojawienia się korozji prętów zbrojeniowych, powszechnie przyjmuje się, że naprawa musi polegać na miejscowym usunięciu skorodowanego betonu, oczyszczeniu odsłoniętego zbrojenia, zabezpieczenia go powłoką antykorozyjną i reprofiliacji konstrukcji, najczęściej przy użyciu zapraw typu PCC nakładanych ręcznie natryskowo. W analizach tych pomijany jest często przebieg procesu korozji stali zbrojeniowej. Po zniszczeniu warstwy pasywującej, na powierzchni stali powstają obszary o różnych potencjałach pomiędzy metalem a elektrolitem, który tworzy ciecz porowa w betonie. Tworzą się lokalne ogniska korozyjne, składające się z punktowych anod i katod. Procesy korozyjne są bardziej widoczne na anodzie, następuje niszczenie stali i pojawia się rdza [2, 3]. Po dokonaniu w takim miejscu punktowej naprawy z zabezpieczeniem stali łącznie, następuje odwrócenie biegunów w ogniwie, i tuż obok naprawionego miejsca następuje dalsza destrukcja.

Problem ten można wyeliminować zastępując bierną, odcinkową ochronę powłokową stali zbrojeniowej, aktywną ochroną – ochroną katodową. Stosowanie tego typu ochrony ma uzasadnienie tylko w odniesieniu do konstrukcji narażonych na intensywne oddziaływanie czynników korozyjnych, zwłaszcza korozji chlorkowej. W obecności zwiększonej ilości jonów chlorkowych procesy korozyjne stali zbrojeniowej w betonie przebiegają znacznie szybciej [2].

Warunkiem technicznym funkcjonowania ochrony katodowej jest zachowanie ciągłości zbrojenia w chronionej konstrukcji poprzez spawanie, zgrzewanie lub bardzo dokładne skręcenie. Ochrona katodowa jest odmiennie realizowana dla konstrukcji podziemnych i podwodnych, gdzie anody dostarczające prąd ochronny są umieszczone w środowisku elektrolitycznym, w odpowiednim oddaleniu. Inaczej ochrona katodowa jest realizowana w konstrukcjach żelbetowych stykających się z atmosferą. Dostarczające prąd anody muszą bezpośrednio stykać się z betonem, na jego powierzchni lub w głębi, gdyż środowiskiem elektrolitycznym jest w takim przypadku ciecz porowa betonu. Umożliwia ona przepływ prądu, wprawdzie małego, 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 na świecie i w Europie od przeszło 10 lat jest inżynierskim narzędziem zabezpieczenia konstrukcji, ujętym w zharmonizowanych normach europejskich [5, 6].

### 3. Ochrona katodowa jako aktywny sposób zabezpieczenia stali zbrojeniowej

Ochrona katodowa konstrukcji żelbetowych, będąca aktywną formą kreującą korzystne warunki środowiska wokół prętów i na ich powierzchni, jest 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.

Norma PN-EN 12696:2004 [6] obejmuje zagadnienia samego wykonania ochrony katodowej z pominięciem kwestii projektowania. Norma ta przewiduje zastosowanie systemów anodowych:

- z powłok organicznych przewodzących i metalowych, układanych na powierzchni betonu,
- ze stabilizowanego tytanu w formie powierzchni-

wych siatek, pasków ciągłych lub siatkowych umieszczanych w bruzdach wyciętych na powierzchni betonu oraz w formie dyskretnych elektrod umieszczanych w bruzdach lub otworach w betonie.

Stosowanie w praktyce ochrony katodowej, również ze względu na brak unormowań w zakresie projektowania, wymaga interdyscyplinarnej wiedzy i dlatego personel powinien mieć odpowiednie kompetencje, których weryfikacja jest ujęta normowo [7]. 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 się umiejętnościami 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 w trakcie budowy most w Cieszynie. Samej instalacji jednak nie wykonano. Zainstalowano 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 [10]. 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 [8]:

1) Ochronę galwaniczną (stosowaną w przypadkach małej intensywności oddziaływania czynników korozyjnych) w formie:

- a) powłoki cynkowej natryskiwanej na gorąco na powierzchnię betonu i punktowo łączonej ze zbrojeniem;
- b) anod traconych umieszczanych w powierzchniowych bruzdach, w pobliżu zbrojenia.

2) Ochronę katodową w formie:

- a) powierzchniowych siatek metalowych stanowiących katodę, pokrytych 2–3 warstwami torkretu. Siatkami pokrywa się całą powierzchnię chronionego elementu konstrukcyjnego. Rozwiązanie to ma zastosowanie w przypadku już istniejących konstrukcji, 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) anody malowanej, do wykonania której 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. Koszty ochrony katodowej

Niestety, kosztów ochrony katodowej nie da się oszacować na takich samych zasadach jak naprawy konstrukcji żelbetowej polegającej na oczyszczeniu prętów zbrojeniowych, ich antykorozyjnym zabezpieczeniu odpowiednią powłoką i reprofiliacji za pomocą zapraw typu PCC, gdzie mają zastosowanie Katalogi Nakładów Rzeczowych. Zastosowanie ochrony katodowej musi być poprzedzone pracami diagnostycznymi i projektowymi. Każde zabezpieczenie musi być indywidualnie przygotowane. Są to rozwiązania droższe od „klasycznej” naprawy, ale poprzez ich wprowadzenie można uniknąć konieczności wykonywania właśnie takich napraw, którym towarzyszy konieczność zapewnienia dostępu i przynajmniej częściowego wyłączenia konstrukcji z użytkowania, hałas, zapylenie, wydzielenia i zorganizowania zaplecza budowy.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Sokólski 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] Jaśniok M., Zybura A., Badania skuteczności zabiegu elektrochemicznej realkalizacji betonu. XLVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB. Opole-Krynica 2002
- [5] 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
- [6] PN-EN 12696:2004 Ochrona katodowa stali w betonie
- [7] PN-EN 15257: 2008 Ochrona katodowa. Poziomy kompetencji i certyfikacja personelu ochrony katodowej
- [8] Controlling corrosion of concrete reinforcements. System Foreva. Broszura R III 2
- [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] Wierzbicki T., Ocena stanu i metody napraw drogowych obiektów inżynierskich w Europie Centralnej. Skróty Raportu Końcowego Projektu ARCHES. IBDiM, Warszawa, maj 2010