

Ochrona katodowa stali zbrojeniowej w długoletnim okresie eksploatacji

Zapobieganie powstaniu ognisk korozji w konstrukcjach jest jednym z głównych czynników, który pozwala na długą, bezpieczną i niezawodną ich eksploatację. Dotyczy to zarówno konstrukcji stalowych [1], jak i konstrukcji żelbetowych [2-4]. W skrajnych wypadkach korozja, np. elementów stalowych lin sprężających, może być przyczyną poważniejszej i trudniejszej do naprawy awarii konstrukcji [5] bądź nawet doprowadzić do katastrofy budowlanej. W niektórych przypadkach samo typowe zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji nie jest wystarczające, żeby zagwarantować długotrwały okres jej użytkowania. Dotyczy to zwykle obiektów, które są poddawane remontom i w których wystąpiły już ogniska korozji zbrojenia. Jednym z rozwiązań, które pozwala zminimalizować ryzyko wystąpienia korozji, jest zastosowanie biernej ochrony katodowej zbrojenia poprzez montaż tak zwanych dyskretnych anod. Taka ochrona katodowa może być wykorzystywana do zabezpieczenia elementów żelbetowych, które znajdują się w wodzie, w powietrzu lub na granicy dwóch różnych ośrodków. Przykładem elementów znajdujących się na granicy woda – powietrze może być filar mostu w rzece lub ściana zbiornika wypełnionego do pewnej wysokości cieczą [6]. W niniejszym artykule opisano, na podstawie przeprowadzonych badań *in situ*, mechanizm działania projektorów TopZINC umieszczonych na elementach zbrojenia konstrukcji żelbetowej.

Mechanizmy powstawania korozji zbrojenia

Stal zbrojeniowa w środowisku świeżego betonu, którego odczyn pH wynosi od około 11,8 do 12,6, pasywowana w naturalny sposób, jest bardzo cienką warstwą tlenków żelaza. Z biegiem czasu odczyn pH betonu zmniejsza się, przyjmując wartość 10 i mniej. Powoduje to utratę właściwości pasywujących przez bardzo cienką warstwą tlenków żelaza. Od tego momentu stal zbrojeniowa nie jest już w naturalny sposób chroniona przez otulinę betonową i na jej powierzchni tworzą się lokalnie liczne miejsca o różnych potencjałach. W miejscach o chwilowo większej ilości elektronów tzw. anodowych dochodzi do reakcji utleniania metalu, czyli korozji. Dodatkowym czynnikiem, który przyspiesza reakcje utleniania, będzie występowanie czynników agresywnych takich jak np. chlorki czy siarczany. Dostępne są liczne badania, które przedstawiają sposób postępowania korozji w czasie w przypadku działania czynników agresywnych [7]. Jest to istotny problem zwłaszcza w przypadku wykonywania remontów konstrukcji, w których beton jest skażony chlorkami. Prawidłowo przeprowadzona naprawa elementu żelbetowego sprowadza się zwykle do oczyszczenia prętów do klasy czystości Sa 2½, zabezpieczenia zbrojenia warstwą antykorozyjną, reprofiliacji PCC i wykonania powłoki ochronnej [8]. Zaprawy PCC używane

I SUMMARY

Cathodic protection of reinforcing steel over a long period of operation

The prevention of corrosion in the reinforcement of concrete structures is one of the main factors that enable their long and reliable operation. The article presents the mechanism of action of zinc protectors, based on *in situ* tests. The presented studies demonstrate that cathodic protection with the use of the Polish TOP ZINC zinc protectors is very efficient.

Keywords: cathodic protection, reinforcing steel, concrete, structures

powszechnie do uzupełniania ubytków w betonie nie mogą i nie posiadają chlorków w swoim składzie. W momencie, w którym w naprawionej konstrukcji żelbetowej dojdzie do kontaktu cieczy, która znajduje się w porach betonu i zawiera chlorki, z cieczą w porach świeżej zaprawy PCC bez zawartości chlorków, to zgodnie z zasadą wyrównania stężeń roztworów dojdzie do błyskawicznej migracji chlorków do świeżej zaprawy PCC. Doprowadzi to do bardzo szybkiej korozji „tradycyjnie naprawionego” zbrojenia. W przypadku niskich otulin już po nawet jednym miesiącu będą widoczne pęknięcia w obszarze wykonanej naprawy, rdzawe wykwity lub odspojenia miejsc z zaprawą naprawczą. Na fot. 1 i 2 pokazano tradycyjnie naprawione obiekty mostowe po kilku miesiącach od zakończenia prac remontowych w obszarze betonu skażonego chlorkami.

W celu oszacowania, w jakim prawdopodobieństwem i z jaką tendencją w przyszłości kształtują się procesy korozyjne na próbkach, w zależności od potencjału elementu możemy posłużyć się kryterium ASTM-C 876-91 [9]. Zakłada ono trzy możliwe przedziały prawdopodobieństwa wystąpienia korozji:

- $E_{st} < -350$ mV – występowanie korozji z prawdopodobieństwem 95%,
 - -350 mV $< E_{st} < -200$ mV – występowanie korozji z prawdopodobieństwem 50%,
 - $E_{st} > -200$ mV – występowanie korozji z prawdopodobieństwem 5%,
- gdzie E_{st} – potencjał elementu [mV].

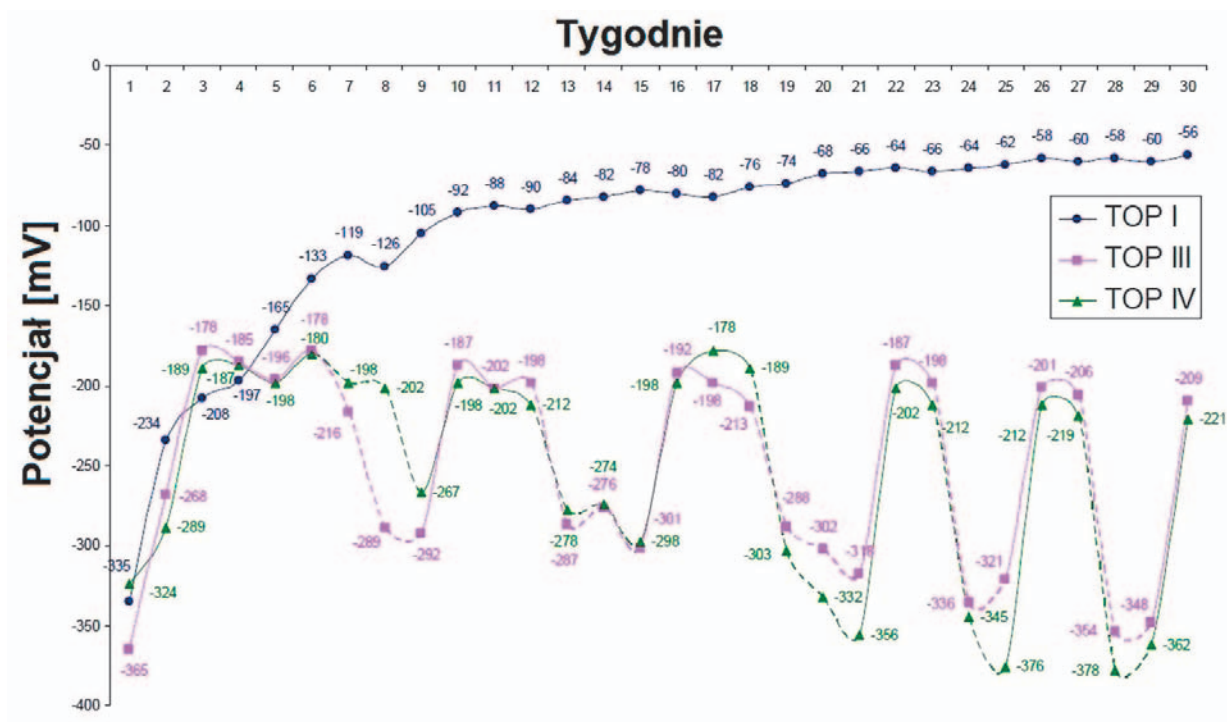
Badania laboratoryjne

W celu sprawdzenia wpływu chlorków na szybkość i stopień korozji zbrojenia przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych w firmie Top Building. Wykonano trzy walcowe próbki żelbetowe o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm. W każdej z próbek zatopiono pręt stalowy o średnicy 10 mm i długości 150 mm. Na rys. 1 przedstawiono zestawienie pomierzonych potencjałów w czasie

mgr inż. Marcin Majewski
Top Building Sp. z o.o.

dr inż. Anna Banaś
Politechnika Gdańska

Zapobieganie powstawaniu ognisk korozji w zbrojeniu konstrukcji żelbetowych jest jednym z głównych czynników, które pozwalają na długą i niezawodną ich eksploatację. W artykule przedstawiono mechanizm działania protektorów cynkowych na podstawie przeprowadzonych badań *in situ*. Przedstawione badania wskazują, że ochrona katodowa z wykorzystaniem polskich protektorów cynkowych TOP ZINC wykazuje bardzo sprawne działanie.



Rys. 1. Zestawienie pomierzonych potencjałów korozyjnych w czasie



Fot. 1. Korozja ocieplenia podporu po kilku miesiącach od naprawy [źródło: Marcin Majewski]



Fot. 2. Zbliżenie na torkret z inhibitorem korozji po 6 miesiącach od naprawy [źródło: Marcin Majewski]

- ▼ dla wszystkich próbek, z czego próbka, oznaczona jako TOP I nie była poddana działaniu czynników agresywnych, próbka TOP III była cyklicznie zanurzana w 3-proc. roztworze NaCl, a próbka TOP IV posiadająca 1-proc. stężenie NaCl w stosunku do masy cementu i również była cyklicznie zanurzana w 3-proc. roztworze NaCl. Liniami przerywanymi zaznaczono moment wyjmowania próbek z 3-proc. roztworu NaCl.

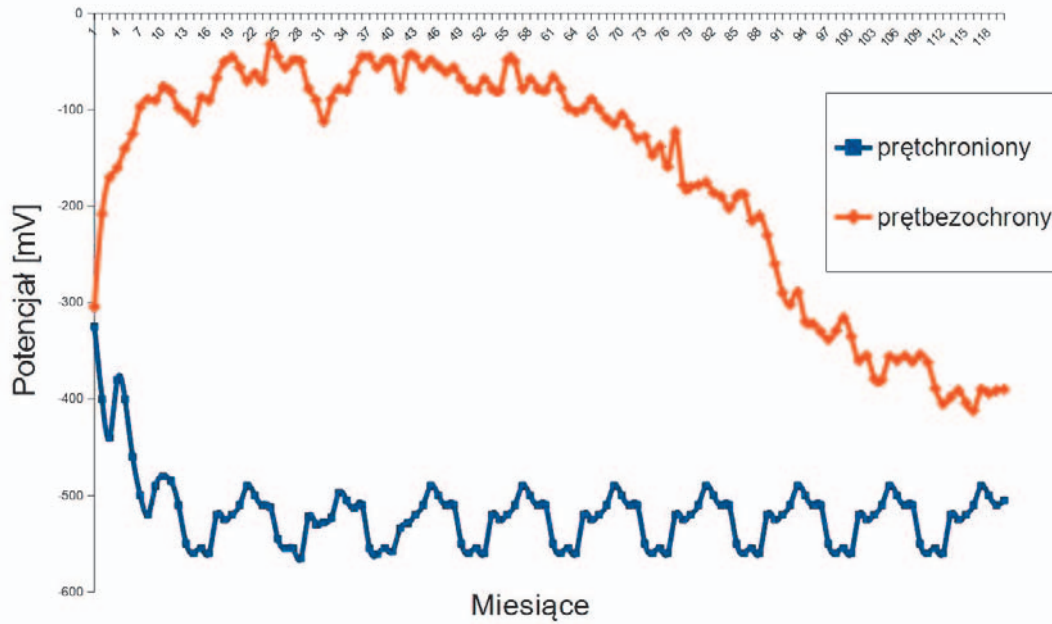
Z rys. 1 możemy odczytać, że próbki TOP III i TOP IV bardzo szybko osiągnęły potencjał wskazujący na 50-proc. prawdopodobieństwo występowania korozji. Dodatkowo wraz z upływem czasu tendencja wartości potencjału próbek przybrała postać funkcji globalnie malejącej. Oznacza to, że po kolejnych tygodniach badań prawdopodobieństwo występowania korozji wynosiłoby 95%. Można również zauważyć, że w momencie zanurzenia próbek w roztworze chlorków wywołują natychmiastowe nieodwracalne procesy korozyjne, ponieważ już od pierwszego zanurzenia w 3-proc. roztworze NaCl mierzony potencjał nigdy nie wzrósł. Natomiast potencjał próbki TOP I, która nie była narażona na działanie chlorków, wzrastał wraz z upływem czasu i po niespełna 3 tygodniach osiągnął wartość, która

szacowała prawdopodobieństwo występowania korozji na poziomie zaledwie 5%.

Zasady i metod zabezpieczenia konstrukcji żelbetowej

Europejska zharmonizowana norma dotycząca wyrobów i systemów ochrony i naprawy konstrukcji betonowych PN-EN 1504-9 [10] za najistotniejsze przyczyny korozji zbrojenia uznaje karbonatację betonu, korozyjne oddziaływanie chlorków, innych halogenków niż chlorki, a także innych chemikaliów rozpuszczalnych w wodzie. Norma ta 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);
- wymianę skażonego lub skarbonatyzowanego betonu (zasada 7, metoda 7.2);
- elektrochemiczną realkalizację skarbonatyzowanego betonu (zasada 7, metoda 7.3);
- realkalizację skarbonatyzowanego betonu przez dyfuzję (zasada 7, metoda 7.4);
- elektrochemiczne usunięcie chlorków (zasada 7, metoda 7.5);



Rys. 2. Porównanie potencjałów korozyjnych [źródło: Marcin Majewski]

Piśmiennictwo

1. Bąk J., Najberg M.: *Kształtowanie stalowych konstrukcji mostowych z uwagi na odporność korozyjną*. „Mosty”, 1/2013, s. 24-28.
2. Wrześcińska J.: *Zabezpieczenia antykorozyjne mostów betonowych*. „Mosty”, 3/2015, s. 18-21.
3. Kordjak T.: *Naprawy mostowych konstrukcji z betonu zbrojonego uszkodzonych wskutek korozji chlorkowej*. Cz. 1. „Ochrona przed Korozją”, 1/2018.
4. Kordjak T.: *Naprawy mostowych konstrukcji z betonu zbrojonego uszkodzonych wskutek korozji chlorkowej*. Cz. 2. „Ochrona przed Korozją”, 2/2018.
5. Madaj A., Mossor K.: *Awaria przęsła dużego mostu sprężonego w wyniku korozji kabli sprężających*. „Mosty”, 3-4/2019.
6. *PN-EN ISO 12696:2017 Ochrona katodowa stali w betonie*.
7. Czarniecki L., Emmons H.: *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*. Kraków 2002.

- podwyższenie oporności elektrycznej otuliny (zasada 8);
- kontrolę obszarów katodowych (zasada 9);
- ochronę katodową (zasada 10);
- kontrolę obszarów anodowych (zasada 11).

W Polsce najczęściej są wykorzystywane metody 7.1 i 7.2 oraz zasady 8, 9 i 11, a rzadziej zasada 10. Od 2012 roku (rekomendacje techniczne ITB [11] i IBDiM [12]) stosowane są elektrody montowane do zbrojenia, które w sposób bezpośredni lub pośredni wykorzystują zasadę 10 normy PN-EN 1504-9 [10].

Badania in situ

Trwające 10 lat, od 2011 r. do 2020 r., badania polowe prowadziła firma Top Building [13]. Tak długi czas prowadzonych badań pozwolił na zaobserwowanie postępujących procesów korozyjnych w trakcie rzeczywistej eksploatacji elementu. W badaniach wykorzystano próbkę, którą usytuowano w skrajni poziomej jezdni drogi klasy Z 1/2 o średniej liczbie pojazdów w dniach powszednich około 12 tys. przez 16 godzin/dobę. Bliskie sąsiedztwo drogi sprawiło, że próbka była narażona na działanie chlorków pochodzących między innymi z zimowego utrzymania dróg. Prostopadłościenna próbka o szerokości 20 cm, głębokości 10 cm i wysokości 70 cm (fot. 3) była wykonana z normowej zaprawy cementowej. Zatopiono w niej zbrojenie w postaci dwóch prętów żebrowanych o średnicy 16 mm ze stali klasy AIIIIN w taki sposób, że ich otulina wynosiła 20 mm. Do jednego z prętów przymocowano protektor cynkowy TopZinc R70 w sposób bezpośredni. Obok chronionego pręta usytuowano pręt bez protektora ochronnego.

Badania (podobnie jak w [14]) polegały na comiesięcznym pomiarze potencjałów korozyjnych zarówno pręta chronionego protektorem, jak i pręta bez ochrony katodowej. Na rys. 2 przedstawiono wartości pomierzonych potencjałów w okresie 120 miesięcy. Należy zaznaczyć, że w okolicy 77. miesiąca, czyli po około 6 latach ekspozycji, na powierzchni betonu próbki pojawiły się mikrozarysowania, które pozwalały na głębszą penetrację wody i chlorków. Analizując wykres pomierzonych potencjałów korozyjnych pręta chronionego, widać, jak w pierwszych miesiącach potencjał systematycznie spadał. Po około 7 miesiącach ustabilizował się on na poziomie -550 mV i później, w zależ-



Fot. 3. Widok na próbkę żelbetową z zatopionymi prętami z protektorem [źródło: Marcin Majewski]

ności od panujących warunków wilgotnościowych, wahał się w zakresie od -500 mV do -600 mV. Analizując wyniki, należy wziąć pod uwagę fakt, że pręty chronione katodowo zawsze będą mieć mierzony potencjał mniejszy od 350 mV. Z tego względu, aby ocenić ich działanie, nie można korzystać z kryteriów ASTM-C 876-91. Na foto. 4 przedstawiono widok na pręt chroniony w miejscu połączenia z protektorem ochronnym. Fot. 5 przedstawia widok na ten sam pręt chroniony, ale w odległości około 40 cm od miejsca podłączenia. Brak śladów korozji na przecię jest potwierdzeniem, że był on chroniony na całej swojej długości przez protektor TopZinc R70 przez okres 10 lat. Natomiast analizując wykres potencjału pręta niechronionego, możemy dostrzec, że w pierwszych miesiącach potencjał dosyć szybko wzrósł do wartości około -100 mV i do około 67. miesiąca prowadzonych badań cały czas był na podobnym poziomie. Zgodnie z kryterium ASTM-C 876-91 prawdopodobieństwo wystąpienia korozji dla



Fot. 4. Widok na chroniony pręt zbrojeniowy w miejscu podłączenia protektora [źródło: Marcin Majewski]



Fot. 5. Widok na chroniony pręt zbrojeniowy w odległości około 40 cm od miejsca podłączenia do protektora [źródło: Marcin Majewski]



Fot. 6. Widok na pręt bez ochrony katodowej, widoczna korozja całej powierzchni pręta [źródło: Marcin Majewski]



Fot. 7. Szczegół pręta bez ochrony katodowej, widoczna korozja całej powierzchni pręta [źródło: Marcin Majewski]

8. Czarnecki L., Garbacz A., Łukowski P.: *Naprawa i ochrona konstrukcji z betonu*. Warszawa 2017.
9. ASTM C876-91: *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. 1999.
10. PN-EN 1504-9 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych*.
11. *Rekomendacja Techniczna ITB RT ITB-1255/2012: Zabezpieczenie stali zbrojeniowej w betonie metodą traconej anody z wykorzystaniem protektorów cynkowych Top Zinc R i Top Zinc R+*. 2013.
12. *Rekomendacja Techniczna IBDiM Nr RT/2012-0124/2: Protektory cynkowe do zabezpieczenia stali zbrojeniowej w betonie TopZinc R, TopZincRS i TopZinc R+*. 2020.
13. Majewski M., Nicer T.: *Raport z badań ochrony antykorozyjnej prętów zbrojeniowych przy użyciu protektorów cynkowych Top Zinc R i Top Zinc R+*. Top Building Sp. z o.o., 2020.
14. Królikowski A.: *Elektrochemiczne badania korozyjne w budownictwie*. Warszawa – Zakopane 1998.
15. Zybura A.: *Zabezpieczanie konstrukcji żelbetonowych metodami elektrochemicznymi*. 2020.

potencjału -100 mV jest mniejsze niż 5%, czyli na pręcie w tym czasie nie występowały procesy korozyjne. Od 67. miesiąca aż do 115 miesiąca prowadzonych badań potencjał spadał systematycznie i osiągnął wartość około -430 mV. Taki potencjał utrzymał się do 120. miesiąca, czyli końca prowadzonego badania. Zgodnie z kryterium ASTM-C 876-91 prawdopodobieństwo wystąpienia korozji dla potencjału -430 mV jest większe niż 95%, czyli na pręcie występują już procesy korozyjne. Na fot. 6 i 7 przedstawiono widok na pręt bez zapewnionej ochrony katodowej, którego cała powierzchnia jest silnie skorodowana. Wykonane badania połowe wykazują, że w okresie badawczym wynoszącym prawie 10 lat zastosowana ochrona katodowa w postaci cynkowych protektorów ochronnych zbrojenia skutecznie chroniła je przed działaniem procesów korozyjnych. Na podstawie uzyskanych w trakcie badań danych, korzystając z pierwszego prawa Faradaya, można określić gęstość prądu, jaki powinien wytworzyć układ galwaniczny (protektor cynkowy – pręt), aby zapewnić ochronę antykorozyjną. Zależność Faradaya ma następującą postać:

$$m_e = k \times I \times t,$$

gdzie:

m_e – masa substancji wydzielonej na elektrodzie [g];
 k – równoważnik elektrochemiczny [g/A s], dla cynku $k = 0,000339$ [g/A s];
 I – natężenie prądu [A];
 t – czas trwania elektrolizy [s].

Przeprowadzone dla układu chronionego protektorem cynkowym obliczenia wykazały gęstość prądu równą 3,49 mA/m². Minimalna gęstość prądu ochronnego dla betonu wynosi 1 mA/m² [15]. Widać więc, że gęstość prądu wytworzona w ogniwie jest znacznie większa, co zapewnia skuteczną ochronę katodową pręta. Oprócz gęstości prądu ochronnego na podstawie prawa Faradaya można obliczyć także „żywność protektora”, zwaną inaczej czasem życia protektora. Jest to czas, w jakim protektor będzie dostarczał do konstrukcji chronionej prąd polaryzacyjny, zapewniając obiektowi ochronę. Można go wyliczyć z następującej zależności:

$$t_p = \frac{m_p \times \eta}{k \times I},$$

gdzie:

t_p – czas życia protektora [lata];
 m_p – masa protektora [g];
 η – sprawność prądowa protektora [%], obliczona jako stosunek q_{rzecz}/q_{teor} , gdzie:
 q_{rzecz} – rzeczywista wydajność prądowa [As/g];
 q_{teor} – teoretyczna wydajność prądowa [As/g];
 k – równoważnik elektrochemiczny [g/As];
 I – natężenie prądu [A].

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że w przypadku niezmiennych warunków teoretyczny czas życia protektora w opisanym przypadku wyniosłby aż 160 lat.

Podsumowanie

Uwzględnienie możliwości wystąpienia procesów korozyjnych, czy to na etapie budowy nowych obiektów, czy na etapie remontu konstrukcji już istniejących, jest bardzo istotną kwestią. Ma ona niekiedy decydujący wpływ na powodzenie całej inwestycji oraz na utrzymanie jak najdłuższego czasu eksploatacji samej konstrukcji.

W omówionym powyżej przypadku po 120 miesiącach ekspozycji próbki w warunkach odpowiadających klasie XD3, XF4 wdrożona ochrona katodowa skutecznie ochroniła pręt zbrojeniowy. Natomiast pręt niechroniony katodowo po 120 miesiącach uległ korozji wżerowej. Jest to dowód na to, że czasem tradycyjnie stosowane sposoby naprawy betonu mogą okazać się niewystarczające. Niestety jest jeszcze zbyt mała świadomość tego zjawiska. Metoda wymaga badań, nagłaśniania i wytłumaczenia, dlaczego mimo przeprowadzonej prawidłowo naprawy żelbetu czasem już po jednym miesiącu może dojść do korozji zbrojenia, które zostało pozornie „prawidłowo” naprawione. Przeprowadzone powyżej obliczenia wykazały, że w omawianym przypadku żywotność protektora wynosiłaby co najmniej 160 lat, co pozwoliłoby uniknąć wielokrotnych remontów tej samej konstrukcji. Dlatego w przypadku remontu obiektów, które były eksploatowane w środowiskach o klasach ekspozycji typu XD lub XF, należy dodatkowo wdrażać inne niż tradycyjne rodzaje ochrony przeciwkorozyjnej. Posługując się normą PN-EN 1504, najbardziej oczywistym wyborem będzie tu *Zasada 10 Ochrona Katodowa*.

Ochrona katodowa z wykorzystaniem polskich protektorów cynkowych wykazuje bardzo sprawne działanie, przy powolnym utlenianiu rdzenia. Obecnie prowadzone są również badania w celu sprawdzenia, jak przebiega proces naprawy elementów żelbetonowych w sąsiedztwie betonu skażonego chlorkami. □