

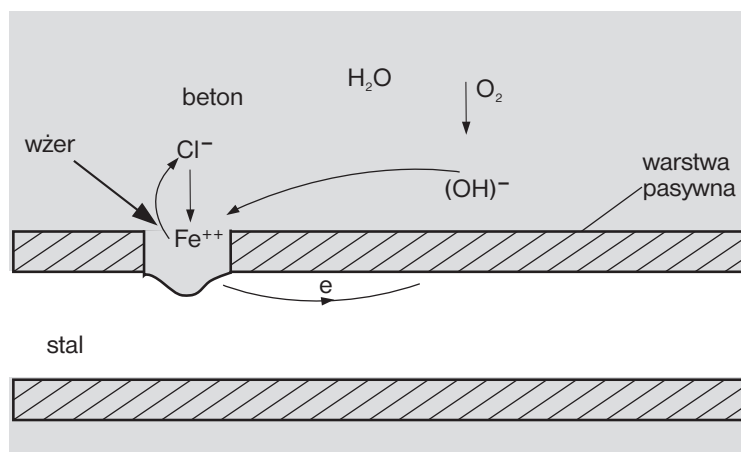
te c h n o l o g i e Nowe możliwości monitorowania zagrożenia korozyjnego konstrukcji żelbetowych

Spośród wielu kryteriów jakościowych, stawianych współczesnemu budownictwu betonowemu, coraz częściej zapewnienie odpowiedniej trwałości wznoszonych obiektów uważa się za wymóg pierwszoplanowy. Uwaga ta ma szczególne znaczenie w przypadku budowli komunikacyjnych.

Trwałość konstrukcji betonowych, jeszcze przed ich oddaniem do eksploatacji, jest ściśle uzależniona od stopnia zagrożenia szkodliwym oddziaływaniem czynników atmosferycznych, chemicznych i biologicznych. Oddziaływanie to może mieć charakter bardzo złożony i wiąże się najczęściej z rozwojem różnego rodzaju procesów chemicznych, prowadzących do stopniowej degradacji. Degradacja ta może dotyczyć zarówno samego betonu, jak i stali zbrojeniowej i najczęściej rozpoczyna się w przypowierzchniowej warstwie betonu. Zjawisko to jest w pierwszym rzędzie wynikiem rozwoju procesów korozyjnych stali zbrojeniowej, spowodowanych utratą przez jego betonową otulinę naturalnych zdolności ochronnych. Zagrożenie korozyjne stali zbrojeniowej jest naturalną konsekwencją rozwoju procesu karbonatyzacji przypowierzchniowej warstwy betonu oraz wgłębnej penetracji chlorków.

Chlorki mogą znajdować się w świeżym betonie od początku, pochodząc z wody zarobowej, kruszywa lub różnego rodzaju dodatków, bądź też wnikać do niego z otaczającego środowiska. Szczególnie zagrożone są tu konstrukcje mostowe i drogowe, narażone na oddziaływanie soli odładzających, wykorzystywanych do zimowego utrzymania dróg. Istotą szkodliwego oddziaływania jonów Cl^- jest fakt, iż w obecności wody i tlenu powodują one naruszenie pasywnej warstewki, ściśle przylegającej do stali zbrojeniowej i stanowiącej jej naturalną ochronę przed korozją (rys. 1). Na skutek występowania w betonie lokalnych różnic potencjału elektrycznego, powstaje ogniwo elektrochemiczne. Na skutek aktywacji jonami chlorkowymi tworzą się obszary katodowe (ochraniana powierzchnia stali) i anodowe

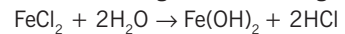
Rys. 1. Schemat przebiegu korozji elektrochemicznej w obecności chlorków



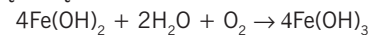
(przebita warstwa pasywna) połączone elektrolitem w postaci wody zamkniętej w porach betonu. Dodatnio naładowane jony żelaza przechodzą z anody do elektrolitu, gdzie łączą się z ujemnie naładowanymi jonami chlorkowymi:



Powstały w ten sposób chlorek żelazawy wchodzi w reakcję z wodą, czego wynikiem jest powstanie wodorotlenku żelazawego i kwasu solnego:



Wodorotlenek żelazawy ulega dalszemu utlenianiu tworząc rdzę.



Odpowiednio wczesne zidentyfikowanie i lokalizacja tego rodzaju zagrożeń jest jednym z podstawowych warunków podjęcia racjonalnych działań pozwalających na zapewnienie konstrukcji wymaganej trwałości w dłuższym okresie. Właściwa kontrola rzeczywistego stanu korozyjnego prętów zbrojeniowych, przeprowadzona w czasie, kiedy na powierzchni betonu nie ma jeszcze wyraźnych objawów ich korozji, pozwala na podjęcie niezbędnych prac zabezpieczających w sytuacji, gdy ich zakres oraz koszty są relatywnie niewielkie.

Mając powyższe na uwadze, w ramach międzynarodowego programu badawczego „Smart Structures” podjęto prace, ukierunkowane na opracowanie zintegrowanego systemu kontroli zagrożenia korozyjnego konstrukcji żelbetowych. Badania te zostały sfinansowane z funduszu V Europejskiego Programu Ramowego. Podstawowym celem przyjętego programu badawczego było opracowanie nowej generacji czujników kontrolnych, umożliwiających bieżące monitorowanie podstawowych parametrów, mających istotny wpływ na powstanie zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej w konstrukcjach betonowych, a przystosowanych zarówno do zamontowania w konstrukcjach nowo wznoszonych, jak i istniejących.

Całość systemu uzupełnia specjalistyczne oprogramowanie, umożliwiające zdalne sterowanie pomiarami, rejestrację danych oraz kompleksową analizę uzyskiwanych wyników. Sterowanie to może mieć charakter manualny, np. za pośrednictwem komputera podłączonego do mostka pomiarowego, w którym zbiega się okablowanie, łączące poszczególne czujniki, lub też działań automatycznie, przy wykorzystaniu łączy internetowych, infrastruktury telefonii stacjonarnej, komórkowej czy wreszcie połączeń satelitarnych.

Charakterystyka opracowanych czujników

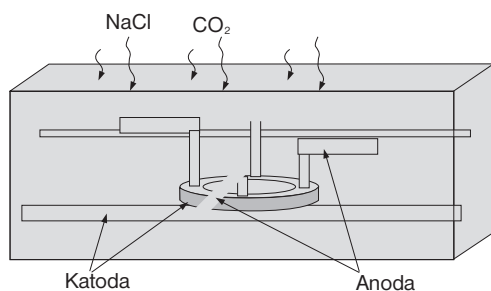
Wykorzystując wcześniejsze doświadczenia, uzyskane przy projektowaniu elektrody ERE-20, służącej do pomiaru potencjału elektrycznego [1,2], generowanego przez powstałe na powierzchni betonu ogniwo korozyjne, opracowano nową generację czujników, przystosowanych do:

- pomiaru wilgotności betonu
- pomiaru stężenia jonów chlorkowych
- oceny stopnia zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej.

Wszystkie wymienione czujniki są instalowane albo poprzez zabetonowanie, w czasie wznoszenia konstrukcji, albo montowane w istniejącym obiekcie w specjalnie do tego celu wykonanych otworach.

„CorroWatch” – czujnik do prognozowania początku korozji stali zbrojeniowej

„CorroWatch” jest czujnikiem, którego działanie polega na pomiarze natężenia prądu korozyjnego (rys. 2). Zbudowany jest z czterech ramion, wykonanych z tego samego gatunku stali co pręty zbrojeniowe. Poszczególne ramiona czujnika umieszczone są wewnątrz betonowej otuliny na różnych głębokościach. Po zabetonowaniu mierzy się spadek napięcia (albo natężenie prądu), płynącego pomiędzy poszczególnymi ramionami wykonanymi ze stali i tytanem pokrywającym korpus czujnika. Początkowo natężenie tego prądu jest bliskie zera. W chwili gdy stal zostanie zaatakowana przez korozję, natężenie tego prądu gwałtownie rośnie i świadczy o powstaniu na danej głębokości bezpośredniego zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej. Pozwala to na śledzenie rozwoju procesu korozji oraz prognozowanie, kiedy front korozji dotrze do prętów zbrojeniowych.

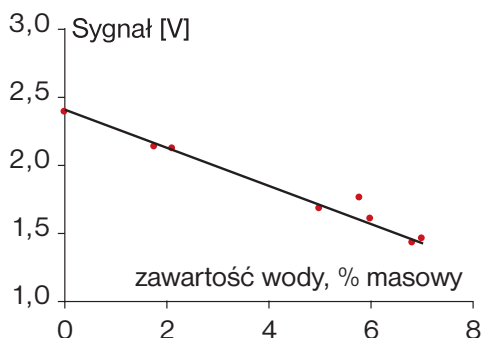


Rys. 2. Istota działania czujnika typu „Corro-Watch”

Czujnik do pomiaru wilgotności betonu

Istota działania czujnika pokazanego na fot. 1 polega na pomiarze zmiany częstotliwości prądu elektrycznego, związanej ze zmianą pojemności elektrycznej betonu, wywołanej zmiennością procentowej zawartości wody w badanym betonie. Częstotliwość ta jest mierzona pomiędzy dwiema gumowymi elektrodami, zamontowanymi w czujniku. Dla uproszczenia pomiarów, zastosowano rozwiązanie techniczne, umożliwiające transformację częstotliwości prądu do postaci napięciowego sygnału elektrycznego, który może być łatwo rejestrowany za pomocą miliwoltomierza o dużym oporze wewnętrznym.

Montaż czujnika polega na zabetonowaniu jego fragmentu, zawierającego mniejszą z dwóch elektrod oraz zamocowaniu na powierzchni betonu większej z nich. Mierzone wartości częstotliwości są ściśle związane z procentową zawartością wody w badanym betonie. Przeprowadzone badania wykazały, że zależność ta jest odwrotnie proporcjonalna (rys. 3), tzn. wyższej wartości częstotliwości odpowiada niższa wilgotność. Tak określona wilgotność jest wartością średnią, wyznaczoną na odcinku pomiędzy powierzchnią betonu i zabetonowaną elektrodą.



Rys. 3. Zależność pomiędzy częstotliwością wyrażoną w voltach a wilgotnością betonu

Czujnik do pomiaru stężenia jonów chlorkowych

Przy projektowaniu czujnika, przeznaczonego do pomiaru stężenia jonów Cl^- (fot. 2), wykorzystano wcześniejsze doświadczenia w zakresie elektrochemicznych pomiarów potencjału elektrycznego pomiędzy dwoma półogniwami [3, 4]. Jedną z elektrod stanowi pręt wykonany z czystego srebra, pokryty chlorkiem srebra ($AgCl$). Drugą elektrodą jest natomiast typowa elektroda odniesienia (ERE-20), wykonana z dwutlenku manganu (MnO_2).

W czasie pomiaru wykorzystuje się fakt, iż potencjał elektrochemiczny elektrody srebrowej jest ściśle uzależniony od wartości stężenia chlorków w badanym betonie. Wpływ ten opisuje wzór Nernsta:

$$E_{Ag/AgCl} = E_{0,Ag/AgCl} - RT \log a_c$$

gdzie:

$E_{Ag/AgCl}$ – aktualny potencjał elektrody srebrowej

$E_{0,Ag/AgCl}$ – standardowy potencjał elektrody srebrowej

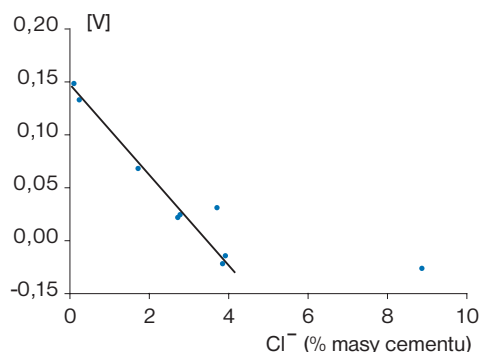
R – stała gazowa

T – temperatura w stopniach Kelvina

a_c – stężenie jonów chlorkowych.

Równocześnie stężenie jonów chlorkowych nie ma wpływu na, będącą punktem odniesienia, wartość potencjału elektrody manganowej. Tak więc, mierząc różnicę potencjału pomiędzy obiema elektrodami, można określić zmianę stężenia chlorków w badanym przekroju betonowym. Konstrukcja czujnika umożliwia, tak jak to pokazano na rys. 2, umieszczenie elektrod srebrowych na różnych głębokościach, co pozwala na monitorowanie stężenia jonów Cl^- na różnych głębokościach i tym samym uzyskanie rozkładu ich stężenia w przekroju betonowym. Teoretycznie dziesięciokrotna zmiana stężenia chlorków winna spowodować zmianę potencjału elektrody srebrowej o 59 mV. Przeprze-

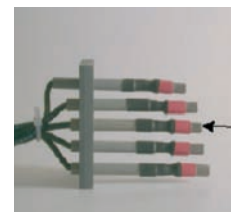
Rys. 4. Zależność pomiędzy potencjałem elektrycznym a stężeniem jonów Cl^- w % wagi cementu



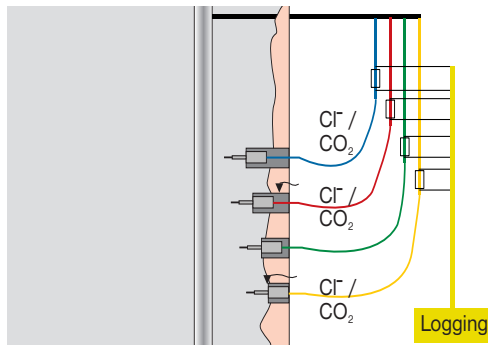
Fot. 1. Widok czujnika do pomiaru wilgotności betonu



Fot. 2. Widok czujnika do pomiaru stężenia jonów chlorkowych



Rys. 5. Schemat ideowy działania czujników do oceny stopnia zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej



wadzone badania wykazały, że w rzeczywistości zmiana ta wynosi około 66 mV, co z praktycznego punktu widzenia gwarantuje wystarczającą dokładność pomiarów. Dla ilustracji na rysunku 4 przedstawiono uzyskaną zależność korelacyjną.

Czujnik do oceny stopnia zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej

Istota działania czujników, przeznaczonych do identyfikacji powstających źródeł korozji stali zbrojeniowej oraz monitorowania tempa jej rozwoju, przedstawiona została na rysunku 5. Najogólniej rzecz biorąc polega ona na pomiarze

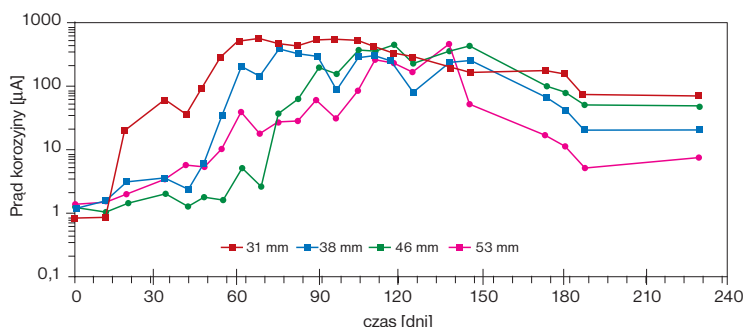
Fot. 3 Widok wiaduktu autostradowego, na którym wykonano prototypową instalację systemu monitorowania zagrożenia korozyjnego



natężenia prądu płynącego pomiędzy katodą, którą stanowi nieskorodowana stal zbrojeniowa, i anodą, montowaną wewnątrz betonowej otuliny w postaci stalowego gwoźdźca, wykonanego z tego samego rodzaju stali co pręty zbrojeniowe [3, 5]. Początkowo, gdy anoda jest „pasywna”, mierzone natężenie prądu jest bliskie zeru. W chwili gdy anoda zaczyna korodować, natężenie mierzonego prądu gwałtownie rośnie, osiągając wartości o rząd, a niekiedy i dwa rzędy wyższe od wartości rejestrowanych bezpośrednio po jej zainstalowaniu.

Czujniki tego typu, podobnie jak omówione wcześniej czujniki do pomiaru stężenia jonów chlorkowych, pozwalają na równoczesną kontrolę zagrożenia korozyjnego na różnych głębokościach,

Rys. 6 Przykładowe wyniki pomiaru prądu korozyjnego, zarejestrowane na różnych głębokościach



co umożliwi monitorowanie prędkości procesów korozyjnych, postępujących w głąb betonu oraz prognozowanie – kiedy front korozyjny dotrze do prętów zbrojeniowych.

Badania w skali naturalnej

Korzystając z doświadczeń uzyskanych na etapie badań laboratoryjnych podjęto próbę oceny działania opracowanego systemu w warunkach poligonowych na istniejącym obiekcie. W tym celu na betonowym wiadukcie autostradowym, zlokalizowanym w okolicach Kopenhagi (Skovdi-geet Bridge – fot. 3) wykonano prototypową instalację, obejmującą montaż ponad 200 różnego rodzaju czujników. Od ponad roku monitorują one na bieżąco podstawowe parametry, warunkujące zaistnienie i rozwój procesów korozyjnych, zachodzących w stali zbrojeniowej.

Dotychczasowe pomiary wykazały pełną przydatność opracowanych czujników do tego rodzaju zastosowań. Szczególnie obiecujące wydają się być wyniki uzyskane za pośrednictwem czujników przeznaczonych do oceny zagrożenia korozyjnego. Dla ilustracji na rysunku nr 6 przedstawiono przykładowe wyniki, zarejestrowane przez zespolony czujnik, dostosowany do równoczesnego pomiaru natężenia prądu korozyjnego na czterech różnych głębokościach: 31 mm, 38 mm, 46 mm i 53 mm.

Podsumowując dotychczasowe doświadczenia należy stwierdzić, że opracowany system monitorowania zagrożenia korozyjnego konstrukcji betonowych stanowi niewątpliwie postęp w dziedzinie diagnostyki rzeczywistego zagrożenia bezpieczeństwa tego rodzaju konstrukcji oraz pozwala na efektywne prognozowanie i planowanie niezbędnych napraw i remontów. Stwarza także możliwości kontrolowania skuteczności działania stosowanych metod ochrony przed korozją.

Oskar Klinghoffer
FORCE Institute, Dania
dr inż. Andrzej Moczko

Instytut Budownictwa, Politechniki Wrocławskiej

Literatura

- 1 Arup H., Klinghoffer O., Mietz J.: *Manganese Dioxide Reference Electrode for Use in Concrete*, Publication of European Federation of Corrosion, nr 25, str. 40-53
- 2 Klinghofer O., Mejlbro L., Poulsen E.: *Prediction of the Reinforcement Corrosion by the Macrocell Technique-Evaluation and Observation*, Transport in Cement-Based Materials 2001, str. 293-307
- 3 Climent-Llorca M.A., Viqueira-Perez E., Lopez-Atalaya M.M.: *Embeddable Ag/AgCl sensors for in-situ monitoring chloride contents in concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 26, 1996, str. 1157-1161
- 4 Fluckiger D., Elsner B., Bohni H.: *Chloride im Beton – Transport und Erfassung*, Forschungsbericht des ibwk der ETH Zurich, 1996
- 5 Bassler R., Mietz J., Raupach M., Klinghoffer O.: *Corrosion risk and humidity sensors for durability assessment of reinforced concrete structures*, Proceedings of EUROCORR 2000, London, article 100805, 2000.