

Konstrukcje betonowe narażone są na różnorakie oddziaływanie szkodliwych czynników atmosferycznych, chemicznych i biologicznych, które mogą prowadzić do ich stopniowej degradacji. Degradacja ta może dotyczyć zarówno samego betonu, jak i stali zbrojeniowej, której jest on naturalnym zabezpieczeniem.

Wprowadzenie

Możliwość wiarygodnej oceny zagrożenia korozyjnego zbrojenia w istniejących konstrukcjach żelbetonowych wiąże się ściśle z badaniem procesów elektrochemicznych, zachodzących na powierzchni zbrojenia w wyniku utraty przez jego betonową otulinę naturalnych zdolności ochronnych [1, 2, 3]. Zjawisko to jest w pierwszym rzędzie konsekwencją rozwoju procesu karbonatyzacji przypowierzchniowej warstwy betonu oraz głębokiej penetracji chlorków.

Beton z racji swojej stosunkowo wysokiej wartości pH (pH 12 ÷ 13,5) stanowi, jak wiadomo, bardzo dobrą osłonę, zabezpieczającą stal zbrojeniową przed korozją. Wysoka zasadowość betonu wynika przede wszystkim z występowania w strukturze betonu dużej ilości wodorotlenku wapnia. W tak silnym środowisku zasadowym stal ulega pasywacji, pokrywając się błonką o grubości 2-20 μm , złożoną z Fe_2O_3 , Fe_3O_4 i $\text{Ca}(\text{FeO}_2)_2$. Jeśli pH spadnie poniżej 11, wtedy efekt aktywnej ochrony zaczyna zanikać. Przy spadku wartości współczynnika pH poniżej 9 ustaje pasywacja i stal zbrojeniowa praktycznie traci swoją ochronę antykorozyjną. Znaczące obniżenie współczynnika pH jest naturalną konsekwencją postępującej karbonatyzacji betonowej otuliny. Proces ten związany jest z przemianą tlenku wapnia (CaO) albo wodorotlenku wapnia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) w węglan wapnia (CaCO_3) pod wpływem dwutlenku węgla (CO_2) i wilgoci.

Obecność jonów Cl^- w betonie jest drugim, po karbonatyzacji, potencjalnym zagrożeniem dla trwałości konstrukcji, jako że przy równoczesnym dostępie tlenu i wody stwarza warunki dla bezpośredniego korozyjnego zagrożenia stali zbrojeniowej. Chlorki znajdujące się w betonie obniżają także jego mrozoodporność. Mogą się one znajdować 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, narażone na oddziaływanie soli odladza-

Metody nieniszczącej diagnostyki zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej w konstrukcjach betonowych

jących, wykorzystywanych do zimowego utrzymania dróg.

Występowanie chlorków w betonie powoduje naruszenie warstewki pasywnej ściśle przylegającej do stali zbrojeniowej i stanowiącej jej naturalną ochronę przed korozją. W wyniku występowania w betonie lokalnych różnic potencjału elektrycznego, powstaje ogniwo elektrochemiczne. Na skutek aktywacji jonami chlorkowymi tworzą się obszary katodowe (ochraniana powierzchnia stali) i anodowe (przebita warstwa pasywna) połączone elektrolitem w postaci wody zamkniętej w porach betonu.

Oslabienie zdolności pasywacyjnych otuliny betonowej prowadzi do wystąpienia na powierzchni stali zbrojeniowej reakcji elektrodowych, które powodują powstanie lokalnych ognisk korozyjnych, co objawia się między innymi występowaniem stacjonarnych (tzn. istniejących w układzie bez ingerencji zewnętrznego źródła prądu) potencjałów elektrycznych. Szybkie i wiarygodne zidentyfikowanie tego rodzaju zagrożenia korozyjnego jest jednym z podstawowych warunków podjęcia racjonalnych działań pozwalających na zapewnienia konstrukcji wymaganej trwałości w dłuższym okresie. Właściwa diagnostyka 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. Niniejsze opracowanie jest próbą przybliżenia tej problematyki, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości badawczych, oferowanych przez współczesne metody nieniszczącej diagnostyki konstrukcji betonowych [4]. Dla ilustracji przedstawionych rozważań, omówiono także przykłady praktycznego wykorzystania tych metod do kompleksowej oceny stopnia zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej w betonowych konstrukcjach mostowych.

Metoda potencjometryczno-opornościowa

Do oceny zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej najczęściej wykorzystuje się pomiary potencjału stacjonarnego, bazujące na doświadczeniach amerykańskich, usankcjonowanych w normie

ASTM-C 876-91 [5]. Również w Polsce opracowane zostały wytyczne dla tego rodzaju pomiarów [6]. Najogólniej rzecz biorąc metoda potencjometryczna polega na pomiarze wartości potencjału elektrycznego generowanego przez ogniwo korozyjne, powstałe na powierzchni betonu. Układ pomiarowy składa się z miliwoltomierza o dużym oporze wewnętrznym oraz elektrody pomiarowej o stałym potencjale. Jako elektrodę pomiarową najczęściej wykorzystuje się półogniwa miedziano-siarczanowe (Cu/CuSO_4) lub srebrowo-chlorowe (Ag/AgCl), bardziej stabilne potencjałowo i mniej podatne na wpływ zanieczyszczeń.

Zgodnie z normą amerykańską [5] oraz opracowanymi na jej podstawie polskimi wytycznymi [6] przyjmuje się następujące kryteria oceny stopnia zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej, w zależności od pomierzonej wartości potencjału stacjonarnego (E_{st}):

- $E_{st} < -350 \text{ mV}$ – występowanie korozji z prawdopodobieństwem 95%
- $-350 \text{ mV} \leq E_{st} \leq -200 \text{ mV}$ – występowanie korozji z prawdopodobieństwem 50%
- $E_{st} > -200 \text{ mV}$ – małe, 5% prawdopodobieństwo korozji.

Dodatkowo przyjmuje się, iż stwierdzenie w danym punkcie pomiarowym gradientu potencjału (spadku napięcia) o wartości większej od 150 mV na odcinku 20 cm świadczy o dużym prawdopodobieństwie wystąpienia w tym punkcie lokalnie aktywnej ogniska korozji.

Zagrożenie korozyjne stali zbrojeniowej może być także monitorowane za pomocą pomiarów oporności elektrycznej ich otuliny betonowej. Pomiary te polegają na badaniu przepływu prądu zmiennego pomiędzy zbrojeniem a umieszczoną nad nim na powierzchni betonu głowicą po-



fot. Archiwum

Fot. 1. „Cover-Master” – model CM52 (z lewej) oraz model CM9 (z prawej)

Fot. Archiwum



Fot. 2. Widok zestawu pomiarowego „BLOODHOUND“

miarową o stosunkowo dużej powierzchni styku lub na badaniu przepływu prądu pomiędzy dwiema elektrodami, umieszczonymi w stałej odległości od siebie w uprzednio wywierconych w tym celu otworach. Przy ocenie wyników pomiaru oporności elektrycznej otuliny betonowej (Θ) przyjmuje się zwykle następujące kryteria:

- $\Theta < 5 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ – bardzo duże prawdopodobieństwo korozji
- $5 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm} \leq \Theta \leq 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ – duże prawdopodobieństwo korozji
- $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm} < \Theta \leq 20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ – nieznaczne prawdopodobieństwo korozji
- $\Theta > 20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ – bardzo małe prawdopodobieństwo korozji.

W stosunku do pomiarów potencjometrycznych, pomiary oporności otulenia są znacznie mniej stabilne w czasie. Istotnie zależą od wielkości styku elektrody pomiarowej z badanym elementem oraz od siły jej docisku do badanej powierzchni. Należy zaznaczyć, że obie wymienione metody są jedynie metodami przybliżonymi, jako że intensywność rozwoju procesów korozyjnych stali zbrojeniowej może być ściśle określona jedynie na podstawie pomiaru natężenia prądu korozyjnego (prawo Faradaya) [2,3], co jest zagadnieniem z praktycznego punktu widzenia bardzo złożonym. Dlatego też, ze względu na stosunkowo prosty pomiar, możliwy do wykonania bezpośrednio na obiekcie, metoda potencjometryczna stanowi bardzo użyteczne narzędzie w niszczącej diagnostyce konstrukcji betonowych [7,8], pozwalające na szybkie i bezinwazyjne zlokalizowanie obszarów aktywnej korozji.

Dokładność tej oceny istotnie wzrasta w przypadku równoczesnego wykonania pomiarów potencjału stacjonarnego oraz oporności betonowej otuliny. Przeprowadzenie analizy porównawczej rozkładu obu tych parametrów na badanej powierzchni umożliwia określenie obszarów o największym prawdopodobieństwie wystąpienia korozji.

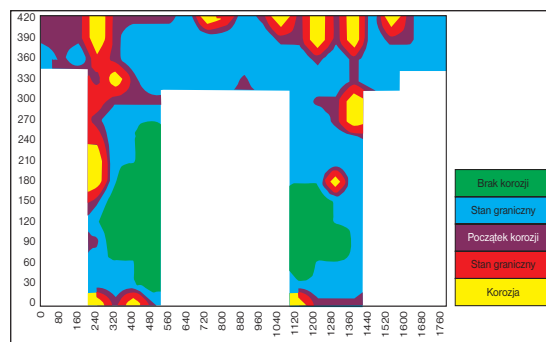
Przykłady badań poligonowych Opis badań

Badania zasadnicze każdorazowo były poprzedzone oceną wizualną, mającą na celu wstępne oszacowanie stanu tech-

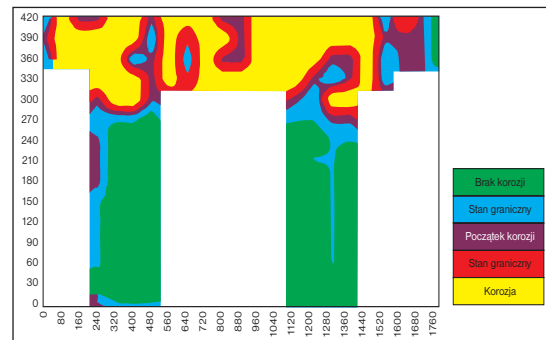
nicznego badanej konstrukcji oraz zlokalizowanie i określenie charakteru występujących uszkodzeń. Kolejnym krokiem było naniesienie na badanych powierzchniach ortogonalnych siatek punktów pomiarowych, zbliżonych do rzeczywistego rozstawu wkładek zbrojeniowych. Poszczególne pręty zbrojeniowe zlokalizowano za pomocą metody elektrooporowej, wykorzystując urządzenie pomiarowe pokazane na fot. 1. Te same urządzenie zostało także wykorzystane do nieniszczącej oceny grubości betonowej otuliny.

Zasadnicze badania przeprowadzono za pomocą zestawu pomiarowego o nazwie „Bloodhound“, który oprócz rejestracji rozkładu potencjałów stacjonarnych, uwzględni gradient potencjału oraz umożliwia równoczesny pomiar oporności elektrycznej betonowej otuliny. Urządzenie to, przedstawione na fot. 2, składa się z miliwoltomierza o dużym oporze wewnętrznym oraz elektrody pomiarowej w postaci półogniwa srebrochlorowego (Ag/AgCl). Zestaw pomiarowy jest dodatkowo wyposażony w przenośne urządzenie elektroniczne, pozwalające na automatyczne gromadzenie danych oraz ich bezpośrednią analizę, a także późniejsze opracowanie za pomocą specjalistycznego oprogramowania. Sam pomiar polegał na kolejnym przykładaniu elektrody do zwilżonej wodą powierzchni betonu w naniesionych wcześniej punktach pomiarowych, przy czym urządzenie pomiarowe zostało uprzednio połączone z wybranym i wcześniej odkutym prętem zbrojeniowym (fot. 3). W tak powstałym układzie elektrycznym rejestrowano napięcie, którego wartość jest uzależniona od aktywności korozyjnej znajdującego się pod elektrodą zbrojenia. Uzyskane wyniki były automatycznie przenoszone do pamięci miernika. Badania poprzedziła kalibracja elektrody pomiarowej oraz sprawdzenie ciągłości zbrojenia.

Wyniki pomiarów potencjometryczno-opornościowych przedstawiono w postaci barwnych map warstwicznych. Dla uściślenia uzyskiwanych wyników wykonano także badania uzupełniające, które w pierwszym rzędzie obejmowały ocenę stopnia karbonatyzacji przypowierzchniowej warstwy betonu oraz stężenia występujących w niej j-



Rys. 1. Mapa rozkładu potencjału korozyjnego badanego fragmentu konstrukcji



Rys. 2. Mapa rozkładu oporności elektrycznej betonowej otuliny zbrojenia w badanym fragmencie konstrukcji

nów Cl^- . Stopień zaawansowania karbonatyzacji betonowej otuliny określono za pomocą „Rainbow-Testu“ (testu tęczęwego), polegającego na spryskaniu badanej powierzchni betonu roztworem specjalnie dobranej kompozycji odczynników chemicznych, identyfikujących poszczególne wartości pH w zakresie od 5 do 13. Odczyn pH równy 11, uznawany powszechnie za wartość graniczną, poniżej której obniża się naturalna zdolność betonu do pasywacji zbrojenia, odpowiada zabarwieniu betonu na fioletowo. Przejście palety barw z koloru fioletowego na zielony ($\text{pH}=9$) sygnalizuje spadek pH poniżej wartości uznawanej za graniczną i potencjalne zagrożenie korozyjne zbrojenia. Oceny zawartości i rozkładu chlorków w



Fot. 3. Widok badanego fragmentu konstrukcji w czasie pomiarów

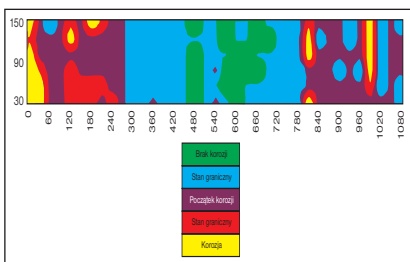


Fot. 4. Widok przyjętego do badań fragmentu konstrukcji (podpora nr 23)

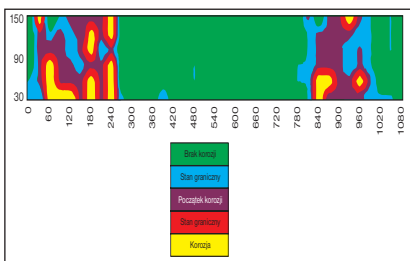
przekroju betonowym dokonano metodą RCT (Rapid Chloride Test). Przy interpretacji uzyskanych wyników kierowano się zaleceniami Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, przyjmując dla elementów żelbetonowych graniczną dopuszczalną zawartość chlorków w betonie równą 0,4%, a dla konstrukcji sprężonych 0,2% wagi cementu. Dodatkowo w wybranych punktach pomiarowych wykonano odkrywki zbrojenia, mające na celu zweryfikowanie uzyskanych wyników z rzeczywistym stanem prętów zbrojeniowych.

Wiadukt drogowy nad torami PKP w miejscowości Kutno

W trakcie kompleksowych badań stanu technicznego betonowej konstrukcji wiaduktu drogowego nad torami PKP w miejscowości Kutno w ciągu ulicy Łęczyckiej dokonano oszacowania zagrożenia korozyjnego zbrojenia betonowych podpór tego obiektu (fot. 4). Badania obejmowały zarówno powierzchnię boczną oczepu, jak i obu słupów. Uzyskane wyniki pomiarów potencjometryczno-opornościowych przedstawiono w postaci barwnych wykresów warstwowych ilustrujących odpowiednio:



Rys. 4. Mapa rozkładu potencjału korozyjnego badanego fragmentu konstrukcji



Rys. 5. Mapa rozkładu oporności elektrycznej betonowej otuliny zbrojenia w badanym fragmencie konstrukcji

- rozkład potencjału korozyjnego (rys. 1)
- rozkład oporności otuliny betonowej (rys. 2).

Analiza porównawcza uzyskanych wyników wykazała, że wzdłuż górnej krawędzi oczepu oraz w jego górnych partiach występuje znaczne zagrożenie korozyjne wkładek zbrojeniowych (kolor żółty i czerwony na rys. 1 i 2). Podobne zagrożenie występuje także w górnych fragmentach słupów oraz przy ich krawędziach zewnętrznych. Stwierdzono ponadto, iż szybkemu rozwojowi korozji stali zbrojeniowej sprzyja w tym przypadku znaczne przekroczenie dopuszczalnego stężenia jonów chlorkowych zarówno w oczepach, jak i w słupach oraz skarbonatyzowanie powierzchniowej warstwy betonu, sięgające średnio 50% grubości betonowej otuliny prętów zbrojeniowych. Obszary, na których stwierdzono korozję wkładek zbrojeniowych, pokrywają się z obszarami zawilgoceń i zacieków wapiennych z ustroju niosącego, spowodowanych brakiem szczelności urządzeń dylatacyjnych i uszkodzeniami izolacji pomostu.

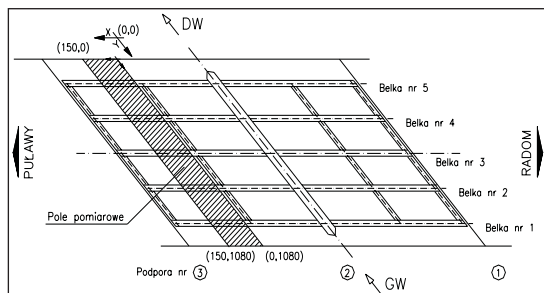
Most drogowy przez rzekę Zwoleńkę w miejscowości Zwoleń

Na rys. 3 przedstawiono przyjęty do analogicznych badań fragment betonowej konstrukcji mostu przez rzekę Zwoleńkę w miejscowości Zwoleń w ciągu drogi krajowej nr 12 Radom – Lublin w km 181+601. Obejmował on pas ustroju niosącego przęsła 2-3 o szerokości około 1,50 m.

Uzyskane wyniki pomiarów potencjometryczno-opornościowych przedstawiono w postaci barwnych wykresów warstwowych ilustrujących odpowiednio:

- rozkład potencjału korozyjnego (rys. 4)
- rozkład oporności otuliny betonowej (rys. 5).

Przeprowadzone za pomocą metody potencjometryczno-opornościowej oszacowanie stopnia zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej w badanej części ustroju niosącego wykazało, że zagrożenie takie aktualnie występuje w jego zewnętrznych fragmentach, obejmujących belki gzymsose, wsporniki podchodnikowe, skrajne belki oraz bezpośrednio do nich przylegające fragmenty płyty pomostu, sięgające mniej więcej do połowy jej rozpiętości, licząc w kierunku sąsiednich belek (kolor żółty, czerwony i czarny na rys. 11 i 12).. Zagrożenie to jest szczególnie widoczne od strony dolnej wody, gdzie sytuację dodatkowo pogarsza fakt, iż w rejonie tym stwierdzono znaczne (ponaddwukrotne)



Rys. 3. Widok z góry przyjętego do badań fragmentu konstrukcji ustroju niosącego

przekroczenie dopuszczalnej wartości stężenia jonów Cl⁻ oraz znaczne zaawansowanie procesu karbonatyzacji betonowej otuliny, sięgające około 60% jej grubości. Na wewnętrznych powierzchniach ustroju niosącego nie stwierdzono natomiast istotnego zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej, a występujące gdzieś pojedyncze ogniska korozji spowodowane były obecnością wtrąceń zwietrzałego krużnicy i niedostateczną grubości otuliny wkładek zbrojeniowych.

dr inż. Andrzej Moczko
Politechnika Wroclawska
Instytut Budownictwa
mgr inż. Tomasz Łakomy
TARCOPOL Spółka z o.o.
Oddział TPM Consulting

Literatura

- [1] Ścisłowski Z.: *Korozja i ochrona zbrojenia*. Arkady, Warszawa, 1981
- [2] Andrade C., Alonso C.: *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on site. Construction and Building Materials, vol. 10, nr 5, 1996, str.315-328*
- [3] Zybura A., Jaśniok T.: *Diagnostyka stanu korozyjnego zbrojenia w żelbetonowych obiektach komunikacyjnych, Drogownictwo, nr 4, 2000, str. 109-116*
- [4] Moczko A.: *Współczesne metody nieniszczącej diagnostyki konstrukcji betonowych, Polski Cement, nr 4 (16), 2001, str. 48-50*
- [5] ASTM-C 876-91 *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*
- [6] Wawrusiewicz A.: *Wstępne wytyczne potencjometrycznego wykrywania stref korodującego zbrojenia w mostach betonowych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1992*
- [7] Wawrusiewicz A.: *Ocena stanu korozyjnego zbrojenia konstrukcji betonowych w warunkach polowych. Ochrona przed Korozją. nr 10, 2000, str. 255-258*
- [8] Wawrusiewicz A.: *Ocena stanu zbrojenia eksploatowanych obiektów mostowych w ciągu autostrady, Inżynieria i Budownictwo, nr 8, 2001, str. 449-451.*