

nu na podstawie badań nieniszczących jest zadowalająca w zakresie $\pm 20\%$, to można przyjąć (rys. 3b), że wpływ temperatury określać można tą metodą w zadowalającym stopniu do temperatury 600°C. Niestety stan powierzchni betonu wygrzanego do temp. 800°C nie pozwala już na takie oszacowania, rozbieżność pomiędzy wynikami pomiaru wytrzymałości na ściskanie dla betonu zwykłego może przekraczać nawet 100% (rys. 3 b).

4. Wnioski i perspektywy

Pomiar twardości powierzchniowej przy użyciu sklerometru Schmidta typu N może stanowić efektywną metodę oceny wpływu temperatury na beton w konstrukcji. Nieniszczący charakter prowadzonych pomiarów oraz łatwość ich wykonywania stanowią o popularności stosowania tej techniki do oceny stanu betonu.

Warunkiem prowadzenia prawidłowej oceny uszkodzeń betonu spowodowanych działaniem tempera-

tury metodą sklerometryczną jest określenie współczynnika korygującego dla betonu nieuszkodzonego działaniem temperatury w oparciu o przyjętą krzywą regresji. Stopień odwzorowania wytrzymałości na ściskanie na podstawie badań twardości powierzchniowej zależy od prawidłowości przyjętych założeń.

Według autorów niezwykle interesujące byłyby badania o szerszym zakresie prowadzące do wyznaczenia zależności pokazujących relacje między wytrzymałością na ściskanie a wartością liczby odbicia w funkcji temperatury. W niedalekiej przyszłości planowane są badania, w których określany będzie wpływ temperatury na wyznaczone metodami niszczącymi, częściowo niszczącymi oraz nieniszczącymi właściwości betonów różniących się składem pod względem jakościowym i ilościowym.

BIBLIOGRAFIA

[1] Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie, décembre 2005, n° 62, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 114

[2] Instrukcja ITB 210, Warszawa 1977

[3] PN-EN 12504-2:2002 Badania betonu w konstrukcjach – Część 2: Badanie nieniszczące – Oznaczanie liczby odbicia

[4] Nagrodzka-Godycka K., Badanie właściwości betonu i żelbetu w warunkach laboratoryjnych, Arkady, W-wa 1999

INFORMACJE O AUTORACH

Dr inż. Izabela Hager, absolwentka Politechniki Krakowskiej (1998), stopień doktora Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Francja (2004), zatrudniona w Politechnice Krakowskiej w Katedrze Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego, zainteresowania naukowe: wpływ temperatury pożarowej na beton oraz inne materiały budowlane, e-mail: ihager@pk.edu.pl.

Dr inż. Tomasz Tracz, absolwent Politechniki Krakowskiej (1999), zatrudniony w Politechnice Krakowskiej w Katedrze Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego, zainteresowania naukowe: zdolność transportowa betonu i innych materiałów dla mediów ciekłych i gazowych, e-mail: ttracz@pk.edu.pl

Adres do korespondencji: dr inż. Izabela Hager, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków.

Określenie stopnia zaawansowania procesów korozyjnych zbrojenia kielichowej konstrukcji dworca w Katowicach

Dr inż. Mariusz Jaśniok, dr inż. Tomasz Jaśniok, prof. dr hab. inż. Adam Zybura

W związku z planowaną przebudową dworca kolejowego w Katowicach przeprowadzono ocenę stanu technicznego konstrukcji obejmującą między innymi badania zagrożenia korozją zbrojenia kielichowych słupów użytkowanych przez ponad 40 lat. Badania laboratoryjne wykonano na zewnętrznych częściach pobranych z obiektu betonowych rdzeni, które zawierały fragmenty prętów zbrojeniowych. Szybkość korozji zbrojenia przy nienaruszonym kontakcie z otuliną wyznaczono na podstawie pomiarów oporu polaryzacji liniowej i spektroskopii impedancyjnej.

Słowa kluczowe: konstrukcje żelbetowe, słupy kielichowe, badania korozji zbrojenia w betonie, pomiar oporu polaryzacji, elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna.

Determination of progression degree of the reinforcement corrosion processes of the goblet construction of the railway station building in Katowice

Because of planned conversion of the railway station building in Katowice technical state assessment of the construction including tests of the reinforcement corrosion risk of the goblet columns used over 40 years among other things were carried out. Laboratory tests on the structure cores' outside parts, which cores contained fragments of the reinforcement bars were performed. On the basis of the linear polarisation resistance and the electrochemical impedance spectroscopy measurements, the corrosion rate of the reinforcement with untouched steel-concrete cover interface was determined.

Key words: concrete structures, goblet columns, tests of the reinforcement corrosion in concrete, linear polarization resistance, electrochemical impedance spectroscopy.

1. Wprowadzenie

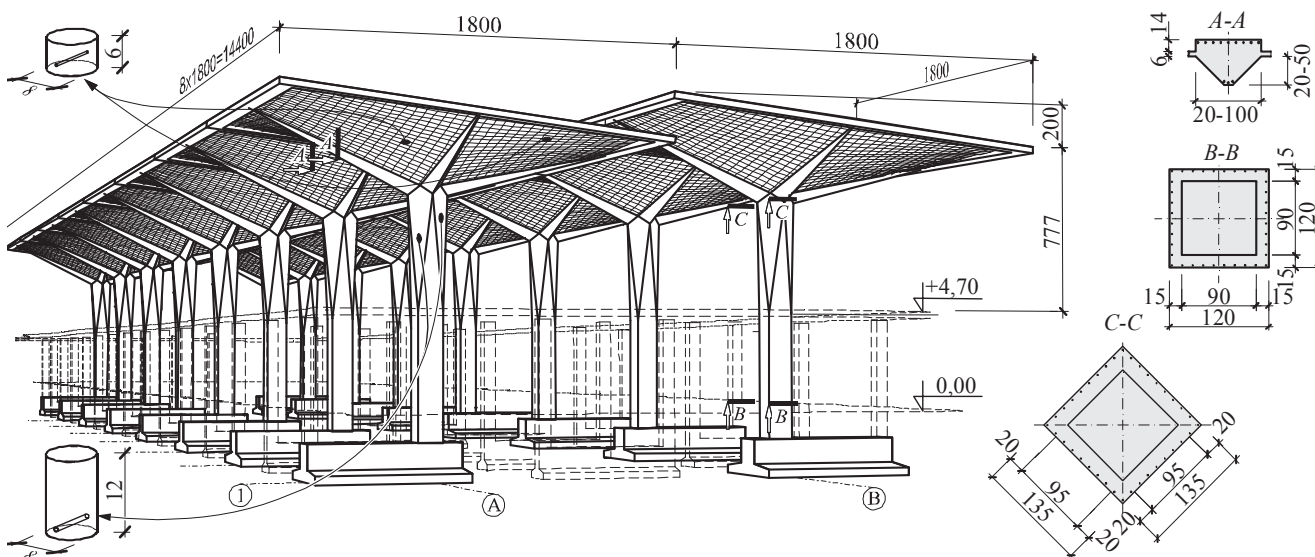
Planując przebudowę dworca kolejowego w Katowicach zamierza się zachować charakterystyczne kielichowe elementy konstrukcyjne, które mają unikalne walory architektoniczne [1]. Szesnaście elementów kielichowych, usytuowanych w dwóch rzędach stanowi przekrycie budynku głównego (rys. 1). Każdy element o wymiarach w rzucie 18×18 m jest podparty jednym, umieszczonym centralnie słupem. Słupy w dolnej części mają stały przekrój kwadratowy o boku 120 cm i grubości ścianki 15 cm (rys. 1, przekrój B-B). Powyżej stropu pośredniego, przekrój słupa ulega zmianie i w najwyższym miejscu przyjmuje kształt obróconego o kąt 45° kwadratu z bokiem 135 cm i grubością ścianki 20 cm (rys. 1, prze-

krój C-C). W słupach centralnych zamocowano wspornikowo 4 żebra promieniste, szerokości $20 \div 100$ cm i wysokości $40 \div 70$ cm (rys. 1, przekrój A-A). Na promienistych żebrach i obwodowych belkach wieńczących (70×20 cm) opierają się cztery powłoki paraboliczno-hiperboliczne grubości 60 mm.

W celu określenia możliwości dalszego użytkowania ponad 40-letnich elementów kielichowych podjęto między innymi badania zagrożenia korozją zbrojenia. Badania elektrochemiczne przeprowadzono metodą spektroskopii impedancyjnej i polaryzacji liniowej na zbrojeniu znajdującym się w wyciętych z konstrukcji rdzeniach betonowych. W artykule przedstawiono wyniki badań wykonanych w jednym, skrajnym elemencie kielichowym.

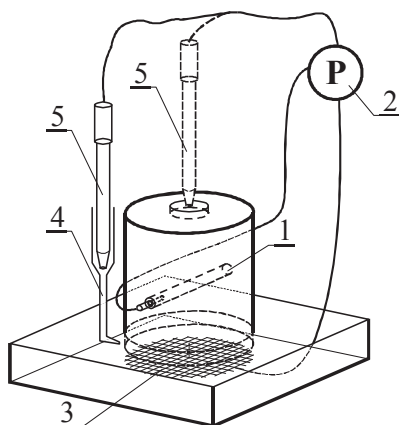
2. Zakres i metodyka badań

Badania zagrożenia korozją zbrojenia przeprowadzono między innymi na wyciętych ze skrajnego elementu kielichowego czterech rdzeniach walcowych zawierających fragmenty stalowych prętów (rys. 1). Dwa rdzenie pobrano z powłoki oraz dwa rdzenie z górnej części słupa. Pomiary wykonano metodami polaryzacyjnymi polegającymi na przepuszczeniu przez badany ośrodek impulsu potencjałowego (liniowo zmiennego – metoda LPR lub sinusoidalnego w szerokim spektrum częstotliwości – metoda EIS), powodującego wytrącenie ze stanu równowagi układu stal – beton i rejestracji odpowiedzi w urządzeniu pomiarowym [2, 3]. W pierwszym etapie, modelując beton wilgotny, zamierzano wytwor-



Rys. 1. Kielichowa konstrukcja dworca w Katowicach – opis w tekście

Fig. 1. Goblet construction of the railway station building in Katowice – description in the text



Rys. 2. Stanowisko do badań polaryzacyjnych dla zbrojeń rdzenia

Fig. 2. Stand for polarization tests on the reinforcement of the cores

rzyć najkorzystniejsze warunki do wystąpienia procesów korozyjnych na powierzchni zbrojenia. Bezpośrednio przed pomiarami wszystkie rdzenie umieszczono w wodzie przez okres 12 godzin. Na nasączonych wodą rdzeniach przeprowadzono w pierwszej kolejności badania zmiennoprądowe (EIS), a następnie badania stałoprądowe (LPR). W drugim etapie modelowano beton bardzo suchy, stwarzając warunki sprzyjające maksymalnemu spowolnieniu procesów korozyjnych. Na wybranych 2 rdzeniach wykonano powtórnie jedynie pomiary impedancyjne, które są mniej wrażliwe na słabą przewodność elektryczną środowiska. Odpowiednią niską wilgotność betonu uzyskano w wyniku naturalnego schnięcia betonu przez 48 godzin w stosunkowo wysokiej temperaturze powietrza wynoszącej $25 \div 32^\circ\text{C}$.

Tabela 1. Wyniki analizy pomiarów impedancyjnych

Table 1. Results of impedance tests analysis

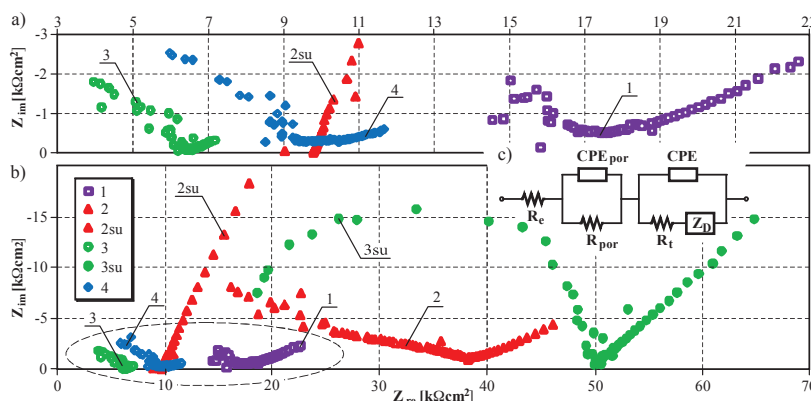
Numer rdzenia	A_p [cm ²]	$E_{Ag AgCl}$ [mV]	Y_0 [$\mu\text{F s}^{\alpha-1}/\text{cm}^2$]	α	Y_{op} [$\text{nF s}^{\alpha-1}/\text{cm}^2$]	α_p	σ [$\text{k}\Omega\text{cm}^2/\text{s}^{1/2}$]	$R_e + R_p$ [$\text{k}\Omega\text{cm}^2$]	R_t [$\text{k}\Omega\text{cm}^2$]	i_{kor} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	CR [mm/rok]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	19,51	-505	205	0,330	68,3	0,480	1,561	16,974	6,05	4,30	0,050
2	36,22	-545	69	0,480	306,8	0,350	1,811	36,220	5,80	4,49	0,052
2su	36,22	+2	135	0,768	0,3	0,500	79,684	9,779	39,84	0,98	0,011
3	18,66	-513	1786	0,300	21,4	0,650	0,280	6,326	1,49	17,42	0,202
3su	18,66	+52	179	0,600	7,7	0,780	8,957	50,382	31,72	1,23	0,014
4	40,83	-533	78	0,295	7,7	0,678	0,204	8,166	3,31	7,86	0,091

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2. Przecięty pręt 1 nawiercano od czoła w taki sposób, aby możliwe było jego podłączenie do potencjostatu 2 (za pomocą tzw. wtyku bananowego). Do naczynia z wodą wodociągową włożono elektrodę pomocniczą 3 z perforowanej blachy nierdzewnej, a następnie rdzeń betonowy. Poziom wody sięgał około 10 mm ponad podstawę rdzenia. Na górnej powierzchni betonu za pośrednictwem wilgotnego filcu lub alternatywnie w wodzie w pobliżu elektrody pomocniczej 3 poprzez tzw. kapilarę Luggina 4, umieszczono chloro-srebrową elektrodę odniesienia 5.

3. Wyniki i analiza pomiarów polaryzacyjnych metodami EIS i LPR

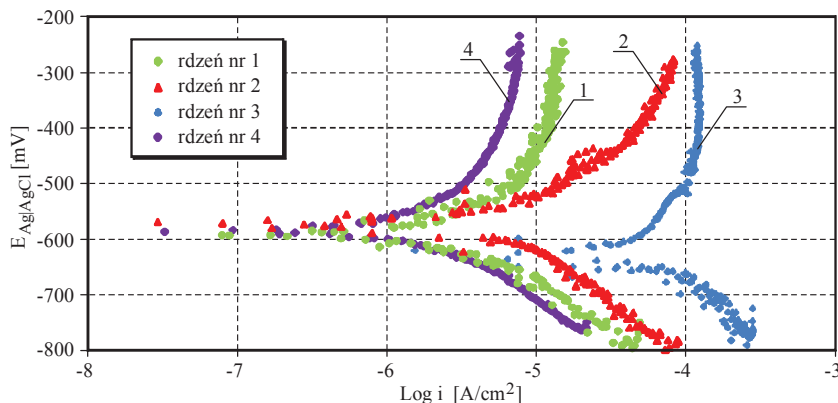
Pomiary impedancyjne (EIS) przeprowadzono zarówno na próbkach nasączonych wodą, jak i suchych. Pomiary wykonywano przy ustalonym zakresie częstotliwości $0,01 \div 10\,000$ Hz, stosując sinusoidalny sygnał zaburzający o amplitudzie potencjału 10 mV względem potencjału korozyjnego. Na rysunku 3 przedstawiono rozkłady widm impedancyjnych na wykresie Nyquista, przy czym rysunek 3a jest powiększeniem fragmentu wykresu z rysunku 3b. Do analizy widm impedancyjnych przyjęto elektryczny schemat zastępczy według rysunku 3c. W schemacie modelującym układ stal-beton poszczególne elementy oznaczają: R_e – rezystancja cieczy porowej w otulinie, R_{por} – rezystancja porów (betonu), CPE_{por} – element stałofazowy charakteryzujący pojemność otuliny betonowej, R_t – rezystancja przeniesienia ładunku, CPE – element stałofazowy charakteryzujący pojemność warstwy podwójnej na granicy faz metal – ciecz porowa, Z_D – impedancja Warburga. Wyniki analizy pomiarów EIS zamieszczono w tabeli 1, w której zestawiono: zinenta-

nym zakresie częstotliwości $0,01 \div 10\,000$ Hz, stosując sinusoidalny sygnał zaburzający o amplitudzie potencjału 10 mV względem potencjału korozyjnego. Na rysunku 3 przedstawiono rozkłady widm impedancyjnych na wykresie Nyquista, przy czym rysunek 3a jest powiększeniem fragmentu wykresu z rysunku 3b. Do analizy widm impedancyjnych przyjęto elektryczny schemat zastępczy według rysunku 3c. W schemacie modelującym układ stal-beton poszczególne elementy oznaczają: R_e – rezystancja cieczy porowej w otulinie, R_{por} – rezystancja porów (betonu), CPE_{por} – element stałofazowy charakteryzujący pojemność otuliny betonowej, R_t – rezystancja przeniesienia ładunku, CPE – element stałofazowy charakteryzujący pojemność warstwy podwójnej na granicy faz metal – ciecz porowa, Z_D – impedancja Warburga. Wyniki analizy pomiarów EIS zamieszczono w tabeli 1, w której zestawiono: zinenta-



Rys. 3. Widma impedancyjne dla zbrojeń rdzenia betonowych

Fig. 3. Impedance spectrums of the reinforcement of the concrete cores



Rys. 4. Krzywe polaryzacji zbrojenia rdzeni betonowych
Fig. 4. Polarization curves of the reinforcement of the concrete cores

Tabela 2. Wyniki analizy pomiarów polaryzacji liniowej

Table 2. Results of linear polarization tests analysis

Numer rdzenia	$E_{Ag AgCl}$ [mV]	β_a [mV]	β_k [mV]	r_p [Ω]	A_p [cm^2]	R_p [$k\Omega cm^2$]	i_{kor} [$\mu A/cm^2$]	CR [mm/rok]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-490	250	-72	610	19,51	11,90	2,04	0,024
2	-509	350	-123	562	36,22	20,36	1,94	0,023
3	-509	368	-101	110	18,66	2,05	16,76	0,194
4	-529	100	-120	290	40,83	11,84	2,00	0,023

ryzowane po rozkruszeniu betonu sumaryczne powierzchnie A_p pobocznic prętów, potencjał korozyjny $E_{Ag|AgCl}$ określony względem elektrody $Ag|AgCl$, parametry Y_0 i Y_{op} , i bezwymiarowe współczynniki α i α_p występujące w definicji impedancji elementu stałofazowego CPE, tj. $Z_{CPE} = Y_0^{-1}(j\omega)^{-\alpha}$, gdzie $j \rightarrow$ jest jednostką urojoną, a $\omega \rightarrow$ częstotliwością kątową. Ponadto w tabelicy 1 zamieszczono wartości współczynnika Warburga σ , sumaryczną wartość rezystancji fazy stałej otuliny R_p i rezystancji cieczy porowej R_e oraz wartość rezystancji przeniesienia ładunku R_t , która jest odwrotnie proporcjonalna do szybkości korozji. W ostatnich kolumnach tabelicy ujęto gęstość prądu korozyjnego i_{kor} oraz wskaźnik szybkości korozji CR (corrosion rate), stanowiące miarę zagrożenia korozją zbrojenia.

Analizując rozkład punktów pomiarowych na wykresie Nyquista można zauważyć, że wszystkie widma zbrojenia rdzeni zawilgoconych (nr 1, 2, 3 i 4) są silnie spłaszczone, co może wskazywać na rozwój procesów korozyjnych. Widma zbro-

jenia rdzeni suchych (2su i 3su) mają przebieg bardziej pionowy i w przypadku rdzenia nr 3su nastąpiło wyraźne przesunięcie w kierunku dodatnich wartości impedancji rzeczywistej, świadczące o wzroście rezystywności wysuszonego betonu [4]. W przypadku rdzenia 2su, również odnotowano wzrost rezystywności betonu, ale pomiar wykonano przez cieńszą warstwę betonu (po obróceniu badanego rdzenia o 180°).

Każdorazowo na danym rdzeniu, po zakończeniu pomiaru zmiennoprądowego i kilkuminutowej obserwacji stabilności potencjału stacjonarnego, przystępowano do wykonywania pomiaru stałoprądowego. Zbrojenie polaryzowano z szybkością 1 mV/s w zakresie zmiany potencjału od -250 mV do +250 mV od potencjału korozyjnego. Wyniki badań stałoprądowych przeprowadzonych na wilgotnych rdzeniach przedstawiono w tabeli 2, w której β_a i β_k są współczynnikami Tafela nachylenia krzywych polaryzacji, a R_p jest oporem polaryzacji liniowej. Najwyższą szybkość korozji otrzymano na zbrojeniu rdzenia nr

3 pobranego ze słupa, natomiast w pozostałych rdzeniach wartości gęstości prądu korozyjnego były zbliżone. Wzrost szybkości korozji w próbce nr 3 miał raczej charakter przypadkowy i wynikał z lokalnie mocniejszego zaawansowania procesów korozyjnych zbrojenia. Kształt krzywych we wszystkich próbkach był zbliżony, lecz w rdzeniach nr 1 ÷ 3 można mówić o kontroli anodowej (ze względu na bezwzględnie wyższe wartości tafelewskich nachyleń anodowych), a w rdzeniu nr 4 mamy do czynienia z kontrolą mieszaną (rys. 4). Kontrola katodowa, wynikająca z ograniczonego dostępu tlenu, w analizowanym przypadku wskazywała na stosunkowo szczelny beton, dodatkowo powierzchnio-owo pokryty nalotem pochodzącym z oddziaływania przemysłowego środowiska. Kontrola anodowa mogła być spowodowana gromadzeniem na powierzchni prętów produktów korozji, które stwierdzono po zniszczeniu próbek.

4. Podsumowanie

Wartości gęstości prądu korozyjnego i_{kor} oraz wskaźnika CR otrzymane metodą spektroskopii impedancyjnej stosunkowo dobrze zgadzały się z wartościami wyznaczonymi metodą polaryzacji liniowej. Wobec powtórzenia się tych wyników należy uznać, że w warunkach skrajnie wilgotnych zbrojenie konstrukcji może być zagrożone korozją. Natomiast porównanie wartości gęstości prądu i_{kor} i wskaźnika CR określonych metodą spektroskopii impedancyjnej w rdzeniach nawilżonych i wysuszonych (nr 2 i 2su – powłoka oraz nr 3 i 3su – słup) wskazuje, że warunki suche istotnie ograniczyły możliwość rozwoju korozji zbrojenia. Po wykonaniu pomiarów polaryzacyjnych zewnętrzne części rdzeni rozkruszone w maszynie wytrzymałościowej i wyjęto fragmenty prętów zbrojeniowych. Na powierzchni części prętów występowały produkty korozji, które najprawdopodob-

niej były wynikiem długotrwałego zamakania betonu na skutek bardzo złego stanu pokrycia dachu. Uzyskanie podobnych wyników w innych elementach kielichowych pozwoliło stwierdzić, że istnieje możliwość dalszego użytkowania tej oryginalnej konstrukcji dworca pod warunkiem niedopuszczenia do nadmiernego zawilgocenia.

BIBLIOGRAFIA

[1] SUD Architectes Polska, Dworzec PKP w Katowicach. ARCHIVOLTA 4 (44)/2009, październik-grudzień 2009, s. 39–44

[2] Andrade C., Alonso C., Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site, Construction and Building Materials Vol. 10, No. 5, 1996, p. 315–328

[3] Lemoine L., Wenger F., Galland J., Study of the Corrosion of Concrete Reinforcement by Electrochemical Impedance

Measurement, Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, p. 118–133

[4] Ford S. J., Shane J. D., Manson T. O., Assignment of features in Impedance Spectra of the Cement-Paste/Steel System, Cement Concrete Research, Vol. 28, No. 12, 1998, p. 1737–1751

INFORMACJE O AUTORACH

Prof. dr hab. inż. Adam Zybura – kierownik Katedry Konstrukcji Budowlanych Politechniki

Śląskiej; zajmuje się problematyką trwałości konstrukcji budowlanych oraz modelowania procesów degradacji korozyjnej żelbetu.

Dr inż. Mariusz Jaśniok, dr inż.

Tomasz Jaśniok – adiunkci w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej; specjalizują się w zagadnieniach zaawansowanej diagnostyki korozyjnej konstrukcji żelbetowych.

Adres do korespondencji: Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice.

Ocena wpływu stanu betonu w konstrukcji na szybkość procesu korozji zbrojenia w obiektach mostowych

Dr inż. Tomasz Łakomy

W artykule zaprezentowano wybrane wyniki i wnioski z badań polowych oraz obserwacji z przeglądów dziesięciu drogowych obiektów mostowych wybudowanych w dwóch wyraźnie różnych okresach czasu, około roku 1950 oraz około roku 1975. W trakcie badań analizowano przebieg w warunkach rzeczywistych oraz zależności między procesami karbonatyzacji, wnikania chlorków a szybkością korozji zbrojenia. Określono również wpływ cech wytrzymałościowych betonu oraz uwarunkowań konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i środowiskowych na szybkość korozji zbrojenia w konstrukcjach mostowych.

Słowa kluczowe: beton, stal zbrojeniowa, karbonatyzacja, chlorki, korozja, mosty.

Influence of concrete condition in structure on steel corrosion in reinforced concrete bridges

In this paper in-situ test results and observations from site inspections of ten road bridges were presented. These bridges were erected in two significantly different time spans: around year 1950 and around year 1975. Progress of carbonation, chloride ingress and steel corrosion in real conditions and relationships among these processes were analyzed. Concrete compressive strength, applied construction solutions as well as working and environmental conditions were also taken into account.

Key words: concrete, steel, rebars, carbonation, chloride, corrosion, bridges.

1. Wprowadzenie

Na skutek oddziaływania agresywnych czynników środowiska zewnętrznego i zachodzących pod ich wpływem reakcji wewnątrz struktury betonu, konstrukcje betonowe ulegają procesowi degradacji. W szczególności

niekorzystnej sytuacji znajdują się obiekty komunikacyjne, które narażone są nie tylko na wpływ czynników środowiska naturalnego, ale również na oddziaływanie zanieczyszczeń przemysłowych oraz soli odladzających wykorzystywanych w zimowym utrzymaniu dróg [1], [2], [3], [4].

Za główne przyczyny niszczenia betonowych obiektów komunikacyjnych w Polsce uznaje się korozję mrozową oraz korozję stali zbrojeniowej. Rozwój procesu korozji stali zbrojeniowej prowadzi do obniżenia trwałości obiektu, a w zaawansowanym stadium również do obniżenia jego nośności