

Ocena zagrożenia korozją zbrojenia konstrukcji żelbetowych

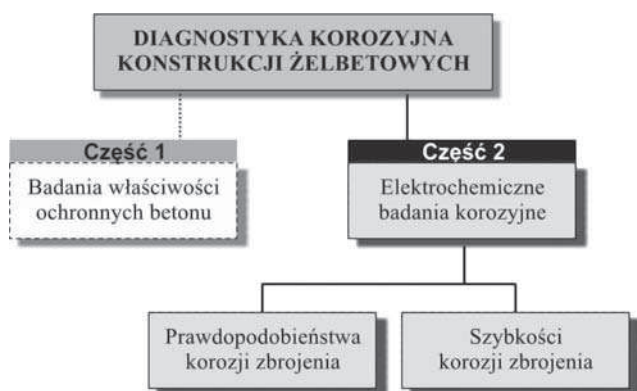
cz. 2 – Elektrochemiczne badania korozyjne

Prof. dr hab. inż. Adam Zybura, dr inż. Mariusz Jaśniok, dr inż. Tomasz Jaśniok,
Politechnika Śląska, Gliwice

1. Wprowadzenie

W celu zapewnienia właściwej trwałości budowli z betonu, Eurokod 2 [1] wprowadził wymagania dotyczące jakości materiałów, technologii wykonania, koncepcji i szczegółów konstrukcji oraz zalecenia przeprowadzenia przeglądów technicznych w trakcie eksploatacji. W ramach przeglądów technicznych obiektów użytkowanych przez dłuższy okres czasu powinno wykonać się kompleksową diagnostykę określającą stan najbardziej narażonych na wpływy środowiska zewnętrznego przypowierzchniowych stref betonu i stalowych prętów zbrojeniowych.

W pierwszej części pracy zamieszczonej w artykule [2] scharakteryzowano przyczyny i skutki oddziaływania środowiska na konstrukcje żelbetowe, a następnie omówiono rozpoczynające diagnostykę korozyjną badania właściwości ochronnych betonu. W niniejszej drugiej części przedstawiono sposoby prowadzenia pomiarów zagrożenia korozją wkładek w konstrukcji oraz zaawansowane badania elektrochemiczne szybkości korozji zbrojenia chronionego otuliną betonową. Schemat prowadzenia badań w ramach kompleksowej diagnostyki korozyjnej ujęto na rysunku 1. Przedstawiono także sprzęt pomiarowy oraz zasady postępowania i analizy wyników badań.

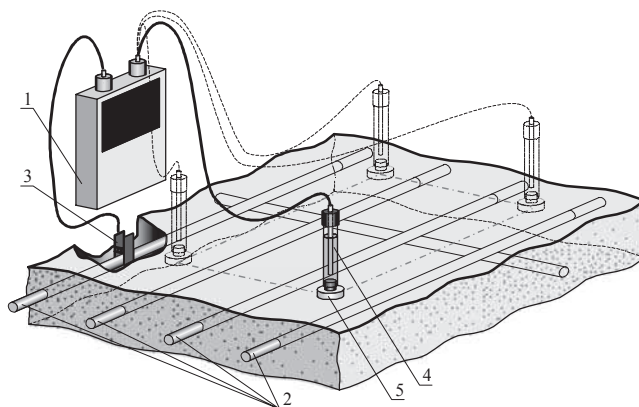


Rys. 1. Klasyfikacja badań stosowanych w diagnostyce korozyjnej konstrukcji żelbetowych

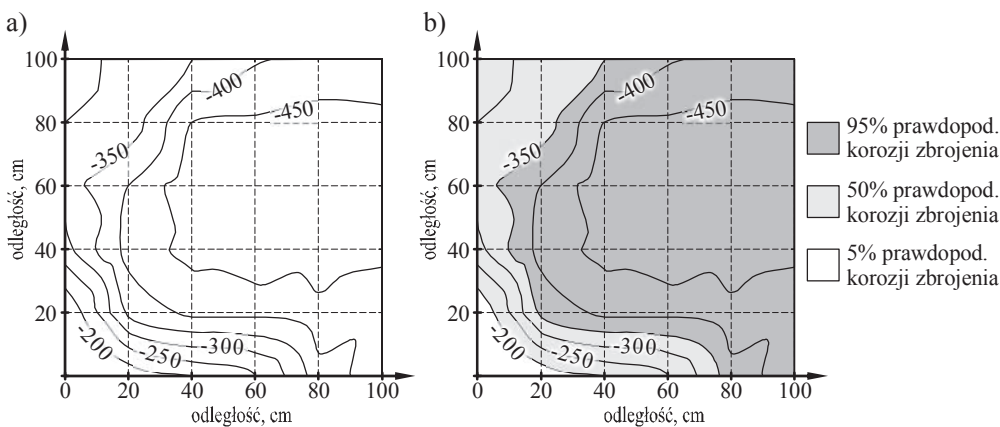
Należy podkreślić, że badania diagnostyczne powinno wykonywać się we wczesnym stadium rozwoju procesów niszczących, gdy jeszcze na powierzchni elementów nie są widoczne uszkodzenia. W tym stanie możliwe jest przedsięwzięcie środków zaradczych ograniczających postęp korozji, a nawet jej powstrzymanie.

2. Pomiary zagrożenia korozją zbrojenia w konstrukcji

Omówione w pracy [2] badania otulenia betonowego nie określają zaawansowania procesów korozyjnych na powierzchni prętów. Jeśli nawet wyniki takich badań wykażą utratę właściwości ochronnych betonu wobec zbrojenia, to jakiegokolwiek wnioskowanie na tej podstawie o zaawansowaniu korozji prętów nie jest możliwe. Ze względu na elektrochemiczny charakter procesów korozyjnych stali, do badań diagnostycznych konstrukcji żelbetowych stosuje się grupę kilku metod badawczych wywodzących się z laboratoriów elektrochemicznych i zaadaptowanych do warunków pomiarowych występujących w betonie. Najczęściej przeprowadza się pomiary potencjału stacjonarnego zbrojenia i rezystywności otulenia betonowego, które są szybkie i proste w wykonaniu. Niestety badania te



Rys. 2. Pomiar potencjału stacjonarnego w konstrukcji – opis w tekście



Rys. 3.
Wydruk mapy potencjału: a) mapa warstwowa wartości potencjału stacjonarnego, b) mapa warstwowa wartości potencjału stacjonarnego z obszarami odpowiadającego prawdopodobieństwa powstania korozji

mają charakter jakościowy, pozwalający określić tylko obszary konstrukcji betonowej o różnym stopniu zagrożenia korozją.

Pomiary potencjału stacjonarnego

Pomiary potencjału stacjonarnego polegają na ustaleniu wartości potencjału elektrycznego generowanego przez ogniwo korozyjne utworzone na powierzchni zbrojenia. Zasady pomiaru przedstawiono na rysunku 2. Podczas badań, po wcześniejszym miejscowym odkuciu betonu otuliny, miernik 1 (pełniący funkcję miliwoltomierza) łączy się ze zbrojeniem 2 zaciskiem 3. Elektrode 4 wielokrotnie przykładają się do powierzchni elementu żelbetowego za pośrednictwem wilgotnej gąbki lub filcu 5 polepszających przewodność elektryczną.

Wyniki badań potencjału stacjonarnego można przedstawić w postaci map warstwowych stanowiących wykresy izolinii potencjału stacjonarnego. Przykładowy wydruk warstwic potencjału przedstawiono na rysunku 3a. Sporządzanie map jest znacznie ułatwione w przypadku stosowania systemu automatycznego gromadzenia danych umożliwiającego dalszą komputerową obróbkę pomiarów.

Wykonując badania potencjału stacjonarnego, zagrożenie korozyjne zbrojenia w danym punkcie pomiarowym ocenia się na podstawie kryterium zalecanego przez nor-

mę [3], a przyjętego w wielu normatywach, także w wytycznych krajowych [4]. W zależności od wartości pomierzonego potencjału stacjonarnego E_{st} stan korozyjny zbrojenia szacuje się w sposób podany w tabeli 1.

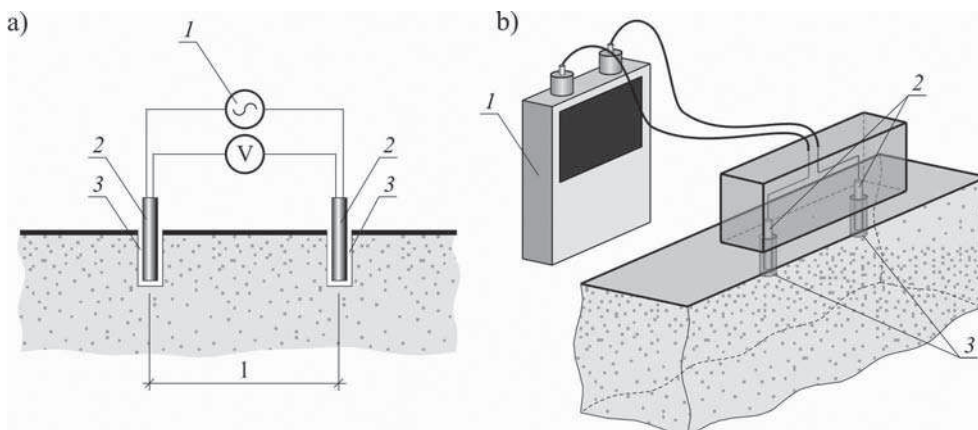
Tabela 1. Potencjałowe kryterium zagrożenia korozyjnego zbrojenia w betonie wg normy [3]

Kryteria oceny potencjału stacjonarnego zbrojenia	Prawdopodobieństwo wystąpienia korozji zbrojenia
$E_{st} < -350$ mV	95%
-350 mV $< E_{st} \leq -200$ mV	50%
-200 mV $< E_{st}$	5%

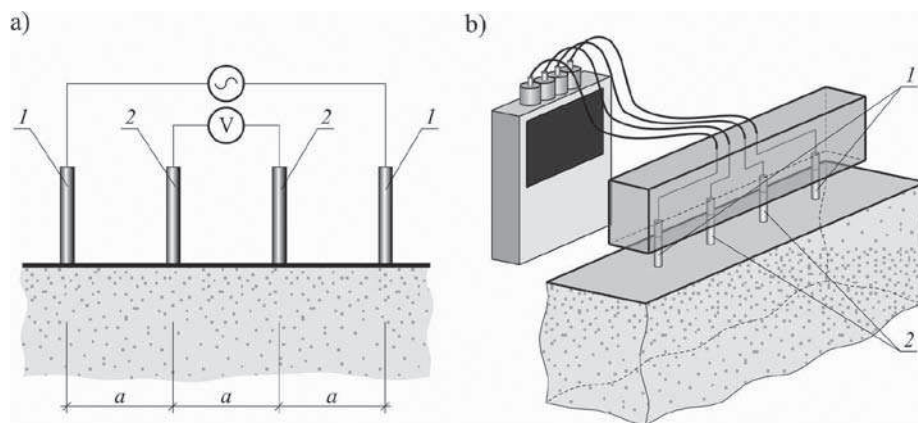
Przykładowy wydruk mapy potencjału z uwzględnieniem powyższych kryteriów przedstawiono na rysunku 3b.

Pomiary rezystywności betonu

Stosowany w laboratoriach chemicznych pomiar rezystywności konduktometrem został także zaadaptowany do badań betonu. Najczęściej badania wykonuje się metodą dwuelektrodową (*two-pin method*) – rys. 4. Metoda ta polega na pomiarze spadku napięcia zadawanego z urządzenia 1 prądu zmiennego przyłożonego do dwóch elektrod 2 umieszczonych w gniazdach 3 wywierconych w otuleni betonu. Odległość między metalowymi elektrodami jest stała, natomiast kon-



Rys. 4.
Pomiar rezystywności betonu elektrooporową metodą dwupunktową z elektrodami wgłębnyymi: a) schemat badań, b) widok urządzenia podczas badania



Rys. 5.
Pomiar rezystywności betonu metodą cztero-punktową Wennera; a) schemat badania, b) widok przykładowego urządzenia podczas badania

takt elektryczny między elektrodami a betonem zapewnia żel kondukcyjny lub pasta grafitowa umieszczone w otworach 3.

Pomiar rezystywności betonu można także wykonać przy użyciu czterech elektrod przykładanych do powierzchni betonu metodą Wennera (*four-pin method*). Metodę tę do betonu zaadaptowano z geotechniki [5, 6]. Polega ona na przepuszczeniu prądu zmiennego między zewnętrzną parą z czterech elektrod umieszczonych w równych odstępach i znajdujących się w kontakcie z powierzchnią betonu – rys. 5. Wykonując badania rezystywności otulenia betonowego, zagrożenie korozyjne zbrojenia szacuje się porównując otrzymane wyniki z kryteriami proponowanymi w materiałach [7] oraz publikacjach [8, 9] (nieznacznie różniących się od siebie), które przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Opornościowe kryterium zagrożenia korozyjnego zbrojenia w betonie wg [8, 9]

Kryteria oceny rezystywności otuliny betonowej	Prawdopodobieństwo wystąpienia korozji zbrojenia
$0 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm} \leq \rho_b < 10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$	duże
$10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm} \leq \rho_b < 20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$	średnie
$20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm} \leq \rho_b$	małe

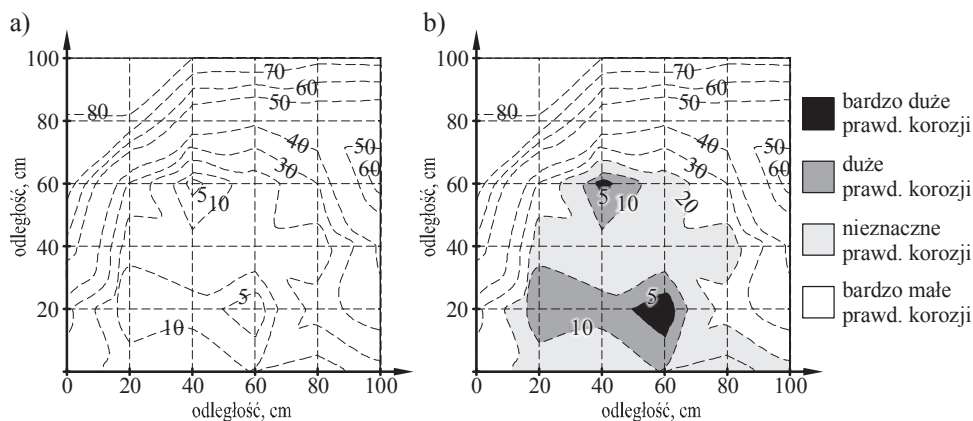
Wyniki badań rezystywności otulenia betonowego, podobnie jak wartości potencjału stacjonarnego, najwygodniej

przedstawia się w postaci map warstwicowych stanowiących wykresy izolinii rezystywności. Przykładowy wydruk warstwic rezystywności pokazano na rysunku 6.

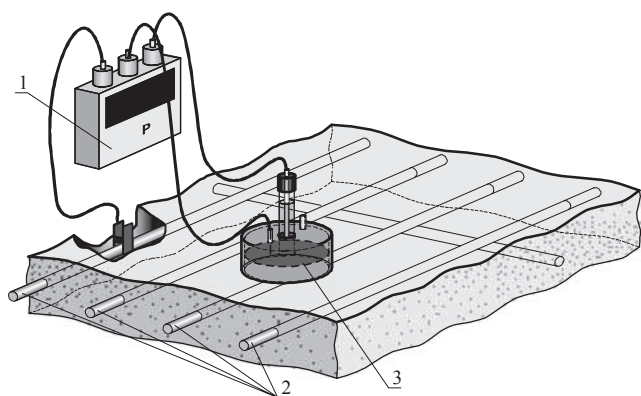
3. Elektrochemiczne badania szybkości korozji zbrojenia

Jak już wspomniano, pomiary prawdopodobieństwa wystąpienia korozji zbrojenia pozwalają tylko zlokalizować obszary konstrukcji żelbetowej o różnym stopniu zagrożenia korozyjnego. Informacje o intensywności korozji zbrojenia można uzyskać jedynie wykonując pomiary szybkości tego procesu. Szybkość korozji wyznacza się na podstawie elektrochemicznych pomiarów polaryzacyjnych. Badania prowadzi się w układzie trójelektrodowym za pomocą potencjostatu 1 – rys. 7.

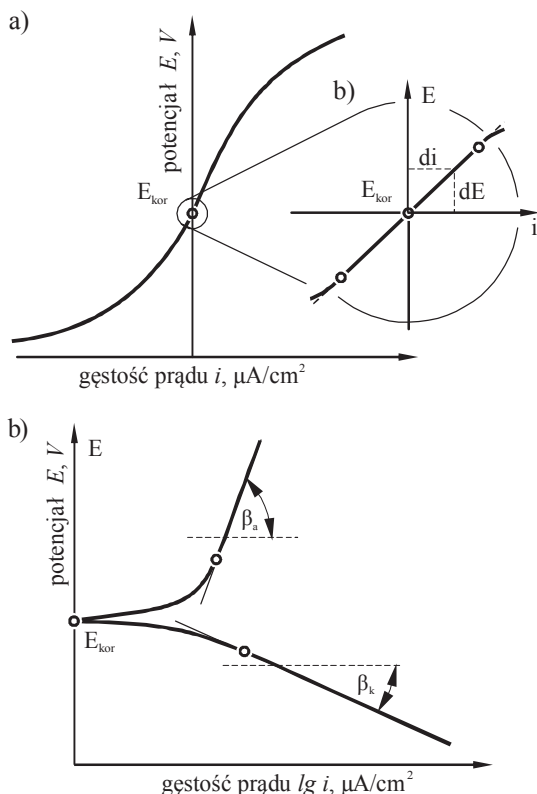
Elektrodą pracującą (badaną) jest zbrojenie 2, natomiast elektroda pomocnicza oraz elektroda odniesienia są umieszczone w głowicy pomiarowej 3 ustawianej na powierzchni badanego elementu żelbetowego. Metoda polaryzacyjna polega na wyprowadzeniu elektrody badanej (zbrojenia) ze stanu równowagi przyłożonym potencjałem zmieniającym się liniowo w ustalonym zakresie. Zadając zmiany potencjału jednocześnie rejestruje się wartości gęstość prądu, które w funkcyjnej zależności od potencjału tworzą krzywe polaryzacji przedstawione na rysunku 8.



Rys. 6.
Wydruk mapy rezystywności otulenia betonowego: a) mapa warstwicowa wartości rezystywności, b) mapa warstwicowa wartości rezystywności z obszarami odpowiedniego prawdopodobieństwa korozji



Rys. 7. Sposób wykonywania badań polaryzacyjnych zbrojenia w konstrukcji żelbetowej – opis w tekście



Rys. 8. Krzywa polaryzacji liniowej przy określaniu oporu polaryzacji – opis w tekście

Analizując przebieg krzywej polaryzacji w zakresie liniowym przy małych wartościach przyłożonego napięcia polaryzującego, wyznacza się zgodnie ze schematem ujętym na rysunku 8a, b opór polaryzacji R_p [10]

$$R_p = \left. \frac{dE}{di} \right|_{i \rightarrow 0, E \rightarrow E_{kor}} \quad (1)$$

Według równana Sterna-Geary’ego opór polaryzacji R_p jest odwrotnie proporcjonalny do gęstości prądu korozyjnego i_{kor}

$$i_{kor} = \frac{B}{R_p}, \quad B = \frac{b_a b_c}{2,303 (b_a + b_c)} \quad (2)$$

gdzie B jest współczynnikiem proporcjonalności, zależnym od tzw. stałych Tafela reakcji anodowej b_a i reakcji katodowej b_c stanowiących nachylenie odcinków prostych na wykresach z rysunku 8c.

Gęstość prądu korozyjnego i_{kor} charakteryzuje intensywność procesów korozyjnych zbrojenia, ponieważ według prawa Faraday’a masa powstającego ubytku Δm jest proporcjonalna do natężenia prądu korozyjnego I_{kor} i czasu t

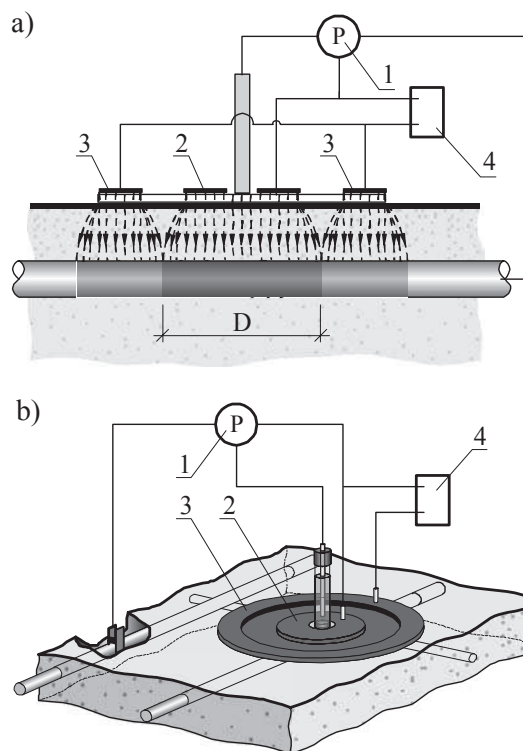
$$\Delta m = k I_{kor} t, \quad I_{kor} = i_{kor} A \quad (3)$$

gdzie k jest równoważnikiem elektrochemicznym żelaza, A – powierzchnią stali.

Na podstawie zależności (3) określa się szybkość korozji V_p podawaną najczęściej jako wskaźnik CR (ang. Corrosion Rate) oznaczający średni ubytek przekroju poprzecznego pręta w okresie jednego roku

$$CR = V_p = \frac{\Delta m}{\rho A t} = 0,0116 i_{kor} [\text{mm/rok}] \quad (4)$$

W zależności (4) ρ oznacza gęstość masy stali. Jednym z najtrudniejszych problemów występujących podczas realizacji badań polaryzacyjnych na ostioniętym betonem zbrojeniu konstrukcji jest nieznaną powierzch-



Rys. 9. Zasada pomiarów polaryzacyjnych wykonywanych metodą „pierścienia ochronnego”: a) rozkład prądów polaryzacji, b) schemat stanowiska



Rys. 10. Urządzenie GECOR 8 [12]

nia badana stalowych prętów. Identyfikacja powierzchni polaryzacji zbrojenia dodatkowo komplikuje się w przypadku występowania korozji lokalnej. Ogniska korozji, które mają zasadniczy wpływ na dystrybucję prądów polaryzacji zniekształcają uzyskiwane wyniki i powodują błędy w określeniu szybkości korozji. Problem ten w pewnym stopniu rozwiązuje technika „pierścienia ochronnego” (*guard ring*), polegająca na ograniczeniu polaryzowanej powierzchni zbrojenia [11]. Zasadę pomiarów tą metodą przedstawiono na rysunku 9.

Obok układu składającego się z potencjostatu 1 i głowicy pomiarowej zawierającej przeciwelektrodę 2, stosuje się dodatkowo zewnętrzną elektrodę ekranującą 3, usytuowaną centralnie wokół elektrody 2. Zadaniem elektrody ekranującej jest ograniczenie bocznego rozchodzenia się sygnału elektrycznego do powierzchni zbrojenia znajdującej się bezpośrednio pod głowicą. Obecnie dostępnych jest kilka zestawów umożliwiają-

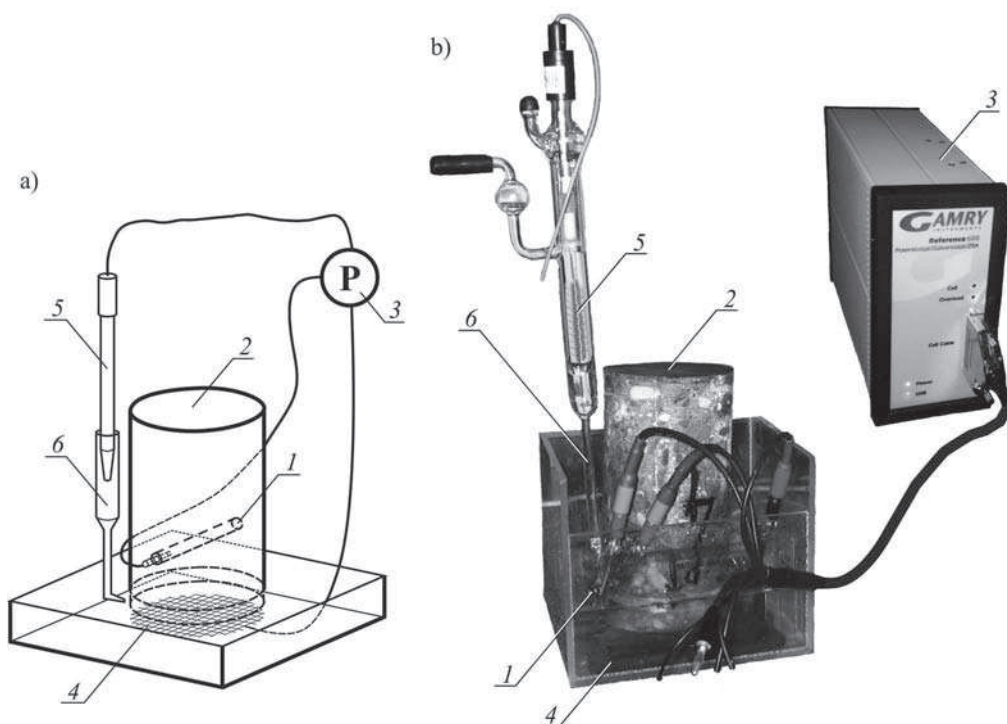
cych określenie gęstości prądu korozyjnego na podstawie pomiaru oporu polaryzacji. Najbardziej znana jest rodzina urządzeń „Gecor” z najnowszym modelem o nazwie GECOR 8 – rys. 10.

Zestaw GECOR 8, oprócz modułu do pomiaru szybkości korozji opartego na metodzie oporu polaryzacji, zawiera także wcześniej omawiane podzespoły do badań potencjału stacjonarnego i rezystywności otulenia betonowego. Sonda pomiarowa zawiera ograniczającą zasięg polaryzacji „elektrodę ekranującą”, którą stanowi system trzech szeregowych elektrod działających dynamicznie.

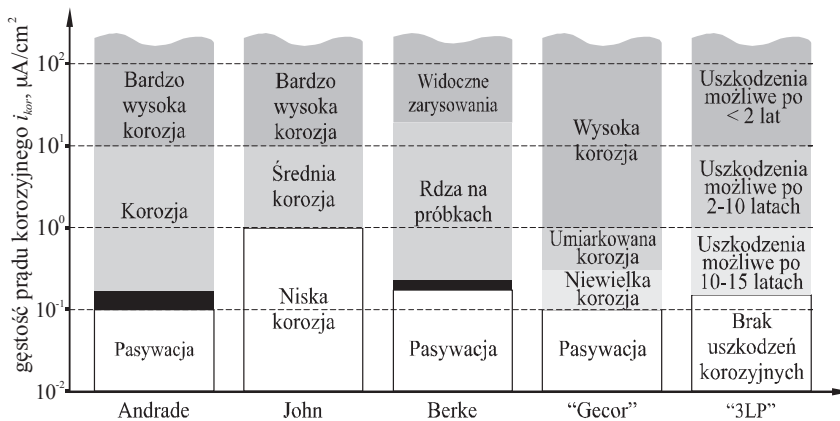
Badania polaryzacyjne szybkości korozji zbrojenia można prowadzić także w laboratorium na pobranych z konstrukcji rdzeniach zawierających odcinek stalowego pręta. Istnieje wówczas możliwość monitorowania i sterowania wieloma parametrami pomiarowymi (np. wilgotnością i temperaturą), które trudno w pełni kontrolować podczas bezpośrednich badań na obiekcie. Jednak najważniejszą zaletą badań elektrochemicznych wyciętych z konstrukcji walcowych rdzeni jest jednoznaczna identyfikacja powierzchni elektrody badanej – zbrojenia.

Stanowisko do badań polaryzacyjnych zbrojenia w wyciętych rdzeniach betonowych przedstawiono na rysunku 11.

Przecięty pręt 1 rdzenia 2 nawierca się od czoła, aby umożliwić podłączenie do potencjostatu 3 (za pomocą tzw. wtyku bananowego). W naczyniu z wodą wodociągową umieszcza się elektrodę pomocniczą 4 z blachy nierdzewnej, a następnie rdzeń betonowy. Poziom wody na dnie naczynia nie powinien przekraczać 5÷10 mm ponad podstawę próbki. Elektrodę odniesienia 5 wraz z kapilarą *Luggina* 6 umieszcza się w wodzie, jak najbliższej pręta zbrojeniowego próbki. Na tak zmontowanym



Rys. 11. Badania polaryzacyjne szybkości korozji zbrojenia na wyciętych z konstrukcji rdzeniach: a) schemat, b) stanowisko pomiarowe – opis w tekście



Rys. 12.
Zestawienie kryteriów zagrożenia korozyjnego zbrojenia w betonie [13]

trójelektrodowym układzie pomiarowym przeprowadza się pomiary oporu polaryzacji zbrojenia.

W celu oceny zaawansowania procesów korozyjnych zbrojenia w konstrukcji konieczne jest przyjęcie skali przyporządkowującej poszczególnym wartościom gęstości prądu odpowiadający stan powierzchni stalowych prętów. Zaproponowane przez kilku autorów i producentów urządzeń pomiarowych kryteria zamieszczono na rysunku 12 – np. [13]. Można zauważyć, że wartość gęstości prądu korozyjnego odpowiadająca granicy pasywności stali w betonie nie jest ściśle ustalona i oscyluje w przedziale $0,1 \div 0,5 \mu A/cm^2$.

4. Podsumowanie

Eurokod 2 [1] wymieniając sposoby zapewnienia właściwej trwałości konstrukcji żelbetowych wskazuje na duże znaczenie przeglądów technicznych w czasie eksploatacji. Jednym z ważnych części przeglądów obiektów użytkowanych przez dłuższy okres czasu powinna być ocena najbardziej narażonych na wpływy środowiska przypowierzchniowych stref betonu i zbrojenia. W pierwszej kolejności powinno się określić właściwości ochronne betonu otuliny na podstawie badań chemicznych modelowych roztworów porowych sporządzonych z warstwowo pobieranego rozdrobnionego materiału. Zagadnienie to przedstawiono w artykule [2]. Otrzymane rozkłady zmian pH lub stężenia chlorków umożliwiają nie tylko ocenę stopnia niekorzystnych zmian w chwili badania, ale także prognozowanie przebiegu tych procesów w miarę upływu czasu. Obecnie najczęściej stosowane wskaźniki fenoloftaleinowe (karbonatyzacja) oraz zestawy do określania zawartości chlorków pozwalają jedynie na zgrubne oszacowania.

Ocena właściwości ochronnych betonu na podstawie badań chemicznych powinna być uzupełniona co najmniej elektrochemicznymi pomiarami potencjału stacjonarnego i rezystywności otuliny, które wskazują prawdopodobieństwo wystąpienia korozji zbrojenia. Jednak dopiero zaawansowane badania polaryzacyjne umożliwiają określenie szybkości korozji zbrojenia i tym samym rzeczywistą intensywność procesów niszczących.

Należy podkreślić, że przedstawione badania powinny wykonywać się wówczas, gdy na powierzchni elementów nie są jeszcze widoczne uszkodzenia. W przypadku wystąpienia odspojenia otuliny i znacznego rozwoju korozji zbrojenia, pomiary diagnostyczne nie są już potrzebne. Widoczne gołym okiem uszkodzenia nie wymagają specjalnych badań korozyjnych, a działania rzeczoznawcy sprowadzają się jedynie do oceny nośności konstrukcji, stopnia zagrożenia bezpieczeństwa użytkowania oraz propozycji jej wzmocnienia lub rozbiórki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [2] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., Ocena zagrożenia korozją zbrojenia konstrukcji żelbetowych. Cz. 1 – Badania właściwości ochronnych betonu. Przegląd Budowlany (praca złożona w Redakcji)
- [3] ASTM-C 867-91. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- [4] Wawrusiewicz A., Wstępne wytyczne potencjometrycznego wykrywania stref korodującego zbrojenia w mostach betonowych, Instytut Budowy Dróg i Mostów, Warszawa 1992
- [5] Roberge P. R., Corrosion Engineering. Principles and Practice, The McGraw-Hill Companies, Inc, United States of America 2008
- [6] Ścisłowski Z., Ochrona konstrukcji żelbetowych, Arkady, Warszawa 1999.
- [7] Materiały informacyjne firmy James Instruments Inc. (<http://www.ndtjames.com>)
- [8] Andrade C., Alonso C., Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, pp. 315-328, 1996
- [9] Bertolini L., Elsner B., Pedferri P., Polder R., Corrosion of Steel in Concrete, Prevention, Diagnosis, Repair. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2004
- [10] Pourbaix M., Wykłady z korozji elektrochemicznej, PWN, Warszawa 1978
- [11] Feliu S., Gonzalez J. A., Escudero M. L., Feliu S. Jr., Andrade M.C., Possibilities of the Guard Ring for Electrical Signal Confinement in the Polarization Measurements of Reinforcements, Corrosion, Vol. 46, No. 12, 1990, pp. 1015-1020
- [12] Materiały informacyjne firmy Germann Instruments (www.germann.org/top.htm)
- [13] Gonzalez J. A., Feliu S., Rodriguez P., Ramirez E., Alonso C., Andrade C., Some questions on the corrosion of steel in concrete. Part-I: when, how and how much steel corrodes, Materials and Structures Vol. 29, January-February 1996, pp. 40-46

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego POIG.01.01.02-10-106/09-03 „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”.