Dr hab. inż. Mariusz JAŚNIOK
Dr inż. Tomasz JAŚNIOK
Katedra Konstrukcji Budowlanych
Politechnika Śląska

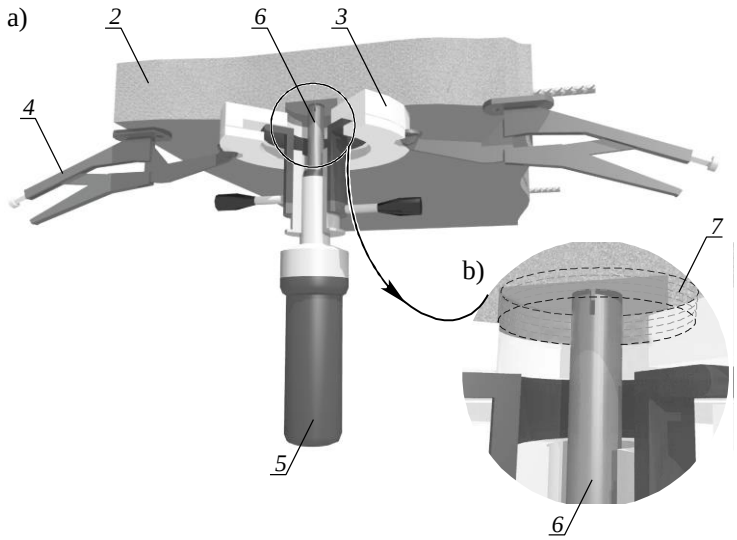
DIAGNOSTYKA KOROZYJNA KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH

1. BADANIA LABORATORYJNE ZASIĘGU KARBONATYZACJI I STĘŻENIA CHLORKÓW

Pobieranie materiału

Materiał do badań zazwyczaj pobiera się wycinając z konstrukcji próbki walcowe lub rozdrabniając warstwowo beton otuliny. Możliwe jest także odkucie fragmentu betonu o niekontrolowanym kształcie.

Pobieranie rozdrobnionego betonu bezpośrednio z konstrukcji można realizować sposobem zgrubnym lub precyzyjnym. Sposób zgrubny polega na wykonaniu wiertłem o dużej średnicy (np. ϕ25, ϕ30 mm) otworu o ustalonej głębokości, zazwyczaj odpowiadającej grubości otulenia zbrojenia. Wówczas cały rozdrobniony beton uzyskany w trakcie wiercenia z otworu charakteryzuje uśrednione właściwości chemiczne całej grubości otulenia. Jednak tym sposobem otrzymuje się niewielką objętość rozdrobnionego betonu, która może nie być wystarczająca do prowadzenia w następnym etapie analiz chemicznych.



Rys. 1. Specjalistyczna ściernica *Profile Grinding Kit* do warstwowego pobierania betonu: a) widok urządzenia na płycie żelbetowej, b) widok w przekroju głowicy ścierającej – opis w tekście

Opisanych wyżej mankamentów pozbawiony jest sposób, w którym stosuje się urządzenie o nazwie *Profile Grinding Kit* [2], umożliwiające precyzyjne pobieranie warstwowo rozdrabnianego betonu. Schemat urządzenia zamocowanego na konstrukcji przedstawiono na rys. 1. Grubość ścieranych warstw, najczęściej 2÷5 mm, może być ustalana z dokładnością do

0,5 mm, co umożliwia gęsty podział grubości otulenia i dokładniejsze odwzorowanie rozkładu stężenia badanego składnika w betonie.

Technika precyzyjnego warstwowego pobierania rozdrobnionego betonu może być stosowana również na wyciętych z konstrukcji rdzeniach betonowych (odwiertach). Walcowe rdzenie umieszcza się w stalowych obejmach będących dodatkowym wyposażeniem urządzenia *Profile Grinding Kit* [2] .

Wykonywanie modelowej cieczy porowej

Z rozdrobnionego betonu do cząstek średnicy ok. 0,2 mm sporządza się modelowe roztwory odwzorowujące ciecz porową. W warunkach krajowych roztwory modelowe wykonuje się zazwyczaj w postaci wyciągu wodnego lub wyciągu uzyskanego metodą ekstrakcji próżniowej. W zaawansowanych laboratoriach zagranicznych odwzorowanie cieczy porowej betonu przeprowadza się metodą ekstrakcji ciśnieniowej – por. [3].

Najprostszym modelem cieczy porowej jest wyciąg wodny, który uzyskuje się mieszając rozdrobniony beton z wodą destylowaną w proporcjach 1:1. Po 24 godzinach ługowania następuje odsączenie fazy stałej, natomiast faza ciekła w przybliżeniu odwzorowuje ciecz zawartą w porach betonu. Otrzymany modelowy roztwór jednak nie w pełni odpowiada składowi cieczy porowej. W porach stwardniałego zaczynu cementowego występuje odmienne ciśnienie od atmosferycznego, co powoduje istnienie innych równowag między składnikami fazy ciekłej i stałej.

Metody pomiarów

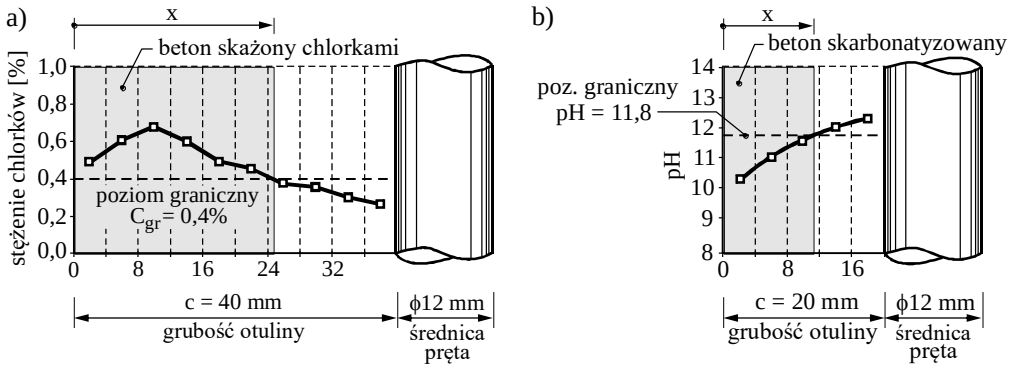
Ze względu na nieunikniony w każdej konstrukcji żelbetowej proces karbonatyzacji betonu zawsze zaleca się wykonanie pomiaru pH roztworu odwzorowującego ciecz porową betonu. Pomiary pH przeprowadza się pH-metrami, które w istocie mierzą różnicę potencjału pomiędzy elektrodą wskaźnikową (szklaną) zanurzoną w roztworze badanym i elektrodą porównawczą (o stałym i znanym potencjale) zanurzoną w roztworze wzorcowym o znanym pH. Współcześnie produkowane pH-metry najczęściej wyposażone są w elektrody zintegrowane, zawierające w jednej obudowie zarówno elektrodę wskaźnikową jak i referencyjną (porównawczą).

Omawiając pomiar pH cieczy porowej w warunkach laboratoryjnych należy wspomnieć o możliwości przybliżonego określania odczynu roztworu papierkami wskaźnikowymi, które zanurzone w badanym roztworze zabarwiają się w zależności od pH roztworu.

Badanie stężenia chlorków w roztworach wodnych można przeprowadzać metodami chemii analitycznej, w tym zalecaną normowo metodą *Mohra* [3]. Łatwiejszym sposobem postępowania przy oznaczaniu stężenia jonów chlorkowych w modelowym roztworze porowym są pomiary za pośrednictwem elektrod jonoselektywnych. W tych elektrodach potencjał zmienia się względem elektrody referencyjnej pod wpływem zmian aktywności jonów w badanym roztworze.

Analiza wyników pomiarów

Wyniki analiz chemicznych modelowej cieczy porowej najwygodniej jest przedstawić w formie rozkładów wartości stężenia w kierunku grubości otulenia betonowego. Na rys. 2a pokazano przykładowy profil stężenia jonów chlorkowych uzyskany w wyniku pomiarów prowadzonych w 10. warstwach 40. mm otulenia, natomiast na rys. 2b przykładowy rozkład wartości pH otrzymany w 5. warstwach 20. mm otulenia. W obu przypadkach dokonano równomiernego podziału otuliny na warstwy grubości 4 mm.



Rys. 2. Zasady analizy wyników badań cieczy porowej betonu: a) profile stężenia chlorków, b) rozkłady pomiarów pH

Analiza profilu stężeń jonów chlorkowych (rys. 2a) polega na porównaniu rozkładu uzyskanego doświadczalnie z poziomem granicznym stężenia, który zgodnie z normą [4] w przypadku konstrukcji żelbetowych wynosi 0,4% w stosunku do masy cementu w betonie. Miejsce przecięcia linii granicznej z rozkładem punktów pomiarowych wyznacza punkt, którego odległość x mierzona od zewnętrznej powierzchni otulenia wskazuje na zasięg strefy nasyconej chlorkami o stężeniu wskazującym na pogorszenie właściwości ochronnych betonu względem zbrojenia. Zasięg tej strefy mniejszy od grubości otulenia ($x < c$) oznacza brak w momencie analizy warunków sprzyjających inicjacji korozji zbrojenia. Natomiast w przypadku, gdy zasięg x osiąga lub przekracza grubość otulenia ($x \geq c$), to należy oczekiwać inicjacji lub dalszego rozwoju procesów korozyjnych na zbrojeniu wywołanych przez jony chlorkowe.

Zasada analizy rozkładów wartości pH w kierunku grubości otulenia (rys. 2b) jest identyczna jak w przypadku analizy profilu stężenia chlorków. Jak wynika z badań doświadczalnych pierwsze symptomy dekompozycji warstewki pasywnej na stali zbrojeniowej pojawiają się, gdy wartość pH w bezpośrednim jej sąsiedztwie obniża się do poziomu 11,8 [1]. Przez analogię do analizy profili stężenia chlorków, punkt przecięcia poziomej linii granicznej pH = 11,8 z pomierzonym rozkładem wartości pH wyznacza granicę umownego zasięgu x strefy betonu zobojętnionego – rys. 2b. Zasięg x frontu karbonatyzacji, osiągający lub przekraczający grubość otulenia wskazuje możliwość rozwoju procesów korozyjnych na powierzchni zbrojenia. W przypadku, gdy zasięg x jest mniejszy od grubości otulenia, to zagrożenie korozją zbrojenia w wyniku karbonatyzacji betonu nie występuje.

2. SZYBKIE OSZACOWANIA NA PODSTAWIE BADAŃ *IN SITU*

Badania modelowych roztworów porowych uzyskanych z rozdrobnionego betonu pobieranego warstwowo umożliwiają stosunkowo dokładne odwzorowanie rozkładu stężeń wnikających z zewnątrz substancji i następnie na podstawie dalszych analiz teoretycznych prognozowanie przebiegu procesów w czasie [5]. Jednak odtworzenie cieczy porowej i jej badanie są pracochłonne. Dlatego do oszacowania właściwości ochronnych betonu stosuje się także szybkie testy wskazujące zasięg karbonatyzacji betonu i zagrożenie korozją chlorkową zbrojenia.

Zasięg karbonatyzacji betonu

Głębokość karbonatyzacji w stwardniałym betonie można szacować metodą fenoloftaleinową ujętą w normie [6]. Materiał do badań pobiera się dłutując beton lub wiercąc serię otworów. Należy podkreślić, że zmiana koloru przełamu betonu z bezbarwnego na czerwonofioletowy następuje przy wartościach pH ≈ 9. Jak już wcześniej wspomniano, przy znacznie

wyższej wartości pH = 11,8 następuje inicjacja procesów korozyjnych zbrojenia. Tak więc ustalenie metodą fenoloftaleinową zasięgu frontu karbonatyzacji może znacznie przeszacować zasięg strefy pogorszonych właściwości ochronnych betonu względem zbrojenia.
Wygodniejszym do stosowania od roztworu fenoloftaleiny są systemowe zestawy odczynników przeznaczonych do oznaczania głębokości karbonatyzacji betonu. *Deep Purple Indicator* [2] stanowi odpowiednik roztworu fenoloftaleiny, który przy wartościach poniżej pH = 8,5÷9,5 wywołuje zmianę zabarwienia świeżego przełamu betonu z ciemno fioletowej na bezbarwną. Inny preparat *Rainbow Indicator* [2] rozpylony na świeży przełam betonu powoduje zróżnicowane zabarwienie betonu uzależnione od wartości pH.

Zasięg wnikania chlorków

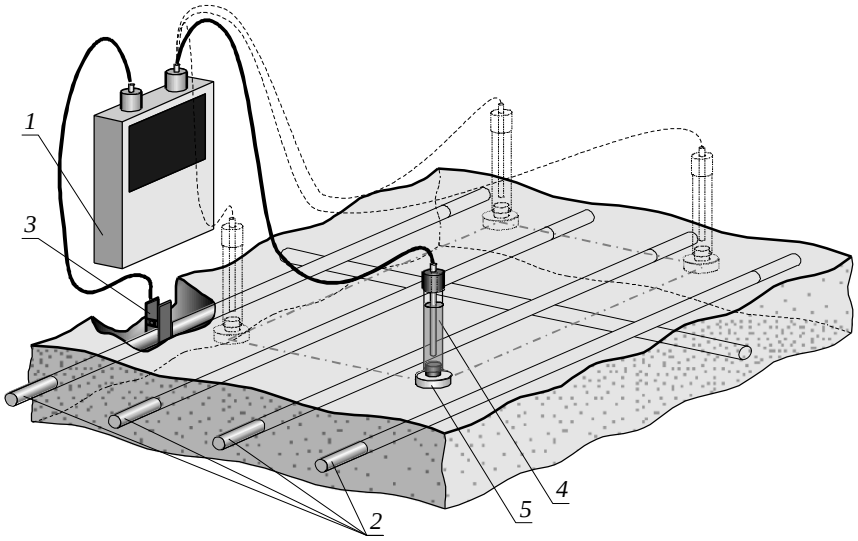
Badania stężenia jonów chlorkowych w betonie konstrukcji żelbetowych można wykonać zestawami pomiarowymi *RTC* i *RCTW* [2]. Zestawy *RTC* i *RCTW* składające się między innymi z odczynników chemicznych, elektrod i miernika elektronicznego zostały umieszczone w jednej walizce, stanowiąc rodzaj mobilnego laboratorium. Przystępując do badań zawartości chlorków w pierwszej kolejności należy pobrać za pomocą wiertaki lub ściernicy (*Profile Grinding Kit* [2]) rozdrobniony beton. Następnie próbkę rozdrobnionego betonu miesza się w odpowiednich proporcjach ze specjalną cieczą ekstrakcyjną, wstrząsając mieszaninę przez 5 minut. Ciecz ekstrakcyjna usuwa jony utrudniające oznaczenia (np. siarczki) i ekstrahuje jony chlorkowe w próbce. Do tak przygotowanego roztworu wprowadza się wykalibrowaną elektrodę, która po podłączeniu do elektronicznego miernika umożliwia oznaczenie zawartości chlorków, automatycznie przeliczanej na procentową zawartość w odniesieniu do masy betonu.

3. POMIARY ZAGROŻENIA KOROZJĄ ZBROJENIA W KONSTRUKCJI

Omówione w punktach 1 i 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 jakiekolwiek 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 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 rys. 3. Podczas badań, po wcześniejszym miejscowym odkuciu betonu otuliny miernik *1* (pełniący funkcję miliwoltomierza) łączy się ze zbrojeniem *2* zaciskiem *3*. Elektrodę *4* wielokrotnie przykłada się do powierzchni elementu żelbetowego za pośrednictwem wilgotnej gąbki lub filcu *5* polepszających przewodność elektryczną.
Wyniki badań potencjału stacjonarnego można przedstawić w postaci map warstwicowych stanowiących wykresy izolinii potencjału stacjonarnego. Sporządzanie map jest znacznie ułatwione w przypadku stosowania systemu automatycznego gromadzenia danych umożliwiającego dalszą komputerową obróbkę pomiarów.



Rys. 3. Pomiar potencjału stacjonarnego w konstrukcji – opis w tekście

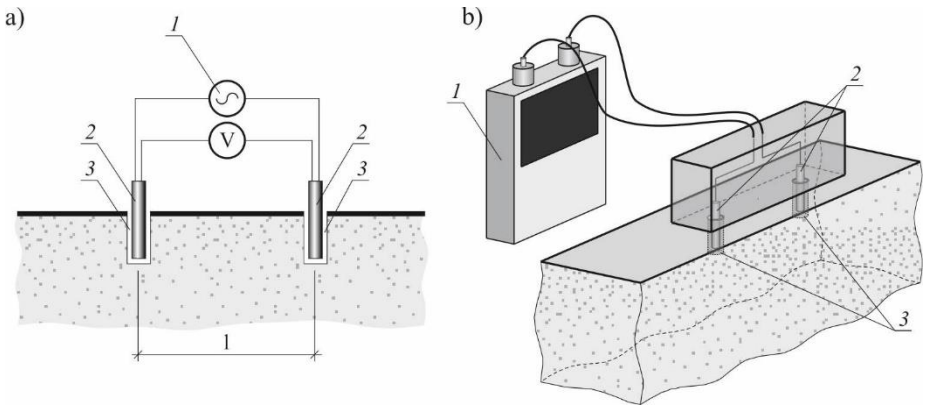
Wykonując badania potencjału stacjonarnego, zagrożenie korozyjne zbrojenia w danym punkcie pomiarowym ocenia się na podstawie kryterium zalecanego przez normę [7], a przyjętego w wielu normatywach, także w wytycznych krajowych [8]. W zależności od wartości pomierzonego potencjału stacjonarnego E_{st} stan korozyjny zbrojenia szacuje się w sposób podany w tablicy 1.

Tablica. 1. Potencjałowe kryterium zagrożenia korozyjnego zbrojenia w betonie wg normy [7]

Kryteria oceny potencjału stacjonarnego zbrojenia	Prawdopodobieństwo wystąpienia korozji zbrojenia
E_{st} < –350 mV	95%
–350 mV ≤ E_{st} ≤ –200 mV	50%
–200 mV < E_{st}	5%

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.



Rys. 4. Pomiar rezystywności betonu elektrooporową metodą dwu-punktową z elektrodami wgłębnymi: a) schemat badań, b) widok urządzenia podczas badania

Metoda ta polega na pomiarze spadku napięcia zadawanego z urządzenia *1* prądu zmiennego przyłożonego do dwóch elektrod *2* umieszczonych w gniazdach *3* wywierconych w otuleniu betonowym. Odległość między metalowymi elektrodami jest stała, natomiast kontakt elektryczny między elektrodami a betonem zapewnia żel kondukcyjny lub pasta grafitowa umieszczone w otworach *3*.

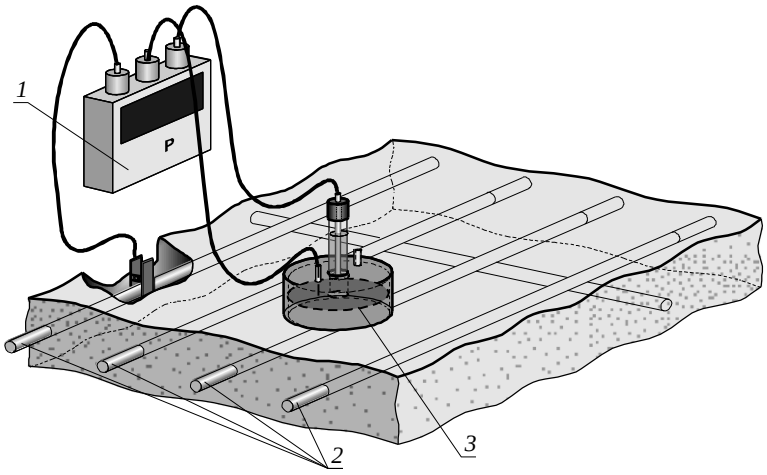
Wykonując badania rezystywności otulenia betonowego zagrożenie korozyjne zbrojenia szacuje się porównując otrzymane wyniki z kryteriami proponowanymi w materiałach [9] oraz publikacjach [10, 11], które przedstawiono w tablicy 2.

Tablica. 2. Opornościowe kryterium zagrożenia korozyjnego zbrojenia w betonie wg [10, 11]

Kryteria oceny rezystywności otuliny betonowej	Prawdopodobieństwo wystąpienia korozji zbrojenia
0 kΩ·cm ≤ ρ_b < 10 kΩ·cm	duże
10 kΩ·cm ≤ ρ_b < 20 kΩ·cm	średnie
20 kΩ·cm ≤ ρ_b	małe

4. 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. 5.



Rys. 5. Sposób wykonywania badań polaryzacyjnych zbrojenia w konstrukcji żelbetowej

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. Analizując przebieg krzywej polaryzacji wyznacza się opór polaryzacji R_p [12], który jest odwrotnie proporcjonalny do gęstości prądu korozyjnego i_{kor}. Gęstość prądu korozyjnego i_{kor} charakteryzuje inten-

sywność procesów korozyjnych zbrojenia, ponieważ według prawa Faraday'a masa powstającego ubytku Δm jest proporcjonalna do natężenia prądu korozyjnego I_{kor} i czasu t

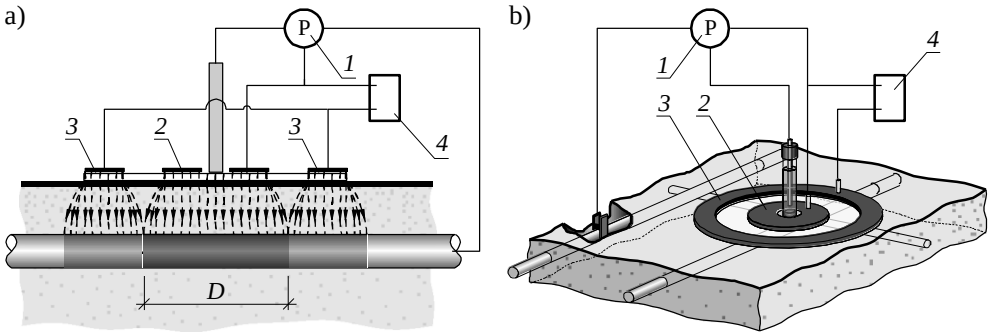
$$\Delta m = kI_{kor}t\,, \quad I_{kor} = i_{kor}A \tag{1}$$

gdzie k jest równoważnikiem elektrochemicznym żelaza, A – powierzchnią stali.
Na podstawie zależności (1) określa się szybkość korozji V_p podawaną najczęściej jako wskaźnik *CR* (ang. Corrosion Rate) oznaczający średni ubytek przekroju poprzecznego pręta w okresie jednego roku

$$CR = V_p = \frac{\Delta m}{\rho A t} = 0{,}0116\, i_{kor}\ [\text{mm/rok}] \tag{2}$$

W zależności (2) ρ oznacza gęstość masy stali.

Jednym z najtrudniejszych problemów występujących podczas realizacji badań polaryzacyjnych na osłoniętym betonem zbrojeniu konstrukcji jest nieznana powierzchnia 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 [13]. Zasadę pomiarów tą metodą przedstawiono na rys. 6.



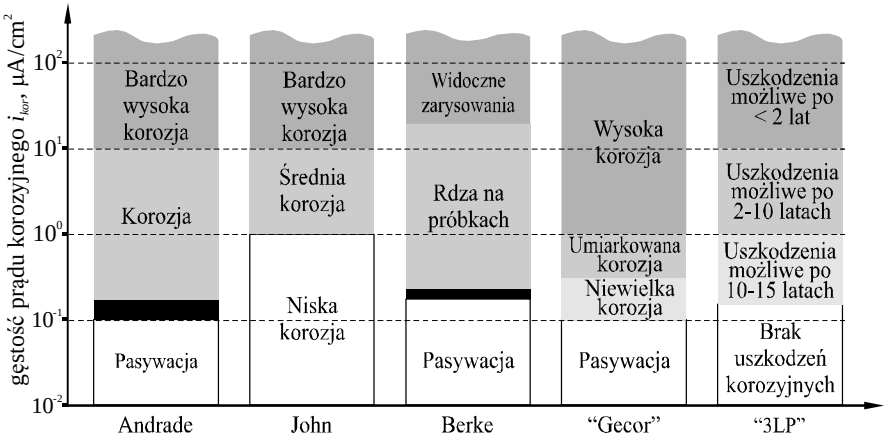
Rys. 6. Zasada pomiarów polaryzacyjnych wykonywanych metodą „pierścienia ochronnego": a) rozkład prądów polaryzacji, b) schemat stanowiska

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 umożliwiających określenie gęstości prądu korozyjnego na podstawie pomiaru oporu polaryzacji. Najbardziej znana jest rodzina urządzeń „Gecor" z najnowszym modelem o nazwie *GECOR 8*.

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.

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 rys. 7 – np. [14]. Można zauważyć, że wartość gęstości prądu korozyjnego odpowiadająca granicy pasywności stali w betonie nie jest ściśle ustalona i oscyluje w przedziale 0,1÷0,5 μA/cm^2.



Rys. 7. Zestawienie kryteriów zagrożenia korozyjnego zbrojenia w betonie [14]

LITERATURA

[1] Ściślewski Z.: *Ochrona konstrukcji żelbetowych*, Arkady, Warszawa 1999.

[2] Materiały informacyjne firmy Germann Instruments (www.germann.org/top.htm)

[3] Wieczorek G.: *Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki i karbonatyzację otuliny*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2002, s.377.

[4] PN-EN 206-1:2003/Ap1:2004 *Beton. Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.*

[5] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T.: *Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu*, t.2, PWN, Warszawa 2011, s.274

[6] PN-EN 14630:2007 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Oznaczanie głębokości karbonatyzacji w stwardniałym betonie metodą fenoloftaleinową*.

[7] ASTM-C 867-91. *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*.

[8] Wawrusiewicz A.: *Wstępne wytyczne potencjometrycznego wykrywania stref korodującego zbrojenia w mostach betonowych*, Instytut Budowy Dróg i Mostów, Warszawa 1992.

[9] Materiały informacyjne firmy James Instruments Inc. (http://www.ndtjames.com).

[10] Andrade C., Alonso C.: Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-side. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 5, pp.315-328, 1996.

[11] Bertolini L., Elsner B., Pedeferri P., Polder R.: *Corrosion of Steel in Concrete*, Prevention, Diagnosis, Repair. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2004.

[12] Pourbaix M.: *Wykłady z korozji elektrochemicznej*, PWN, Warszawa 1978.

[13] 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.

[14] 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.