

Tomasz JAŚNIOK*
Politechnika Śląska

PRÓBA OKREŚLENIA ZASIĘGU POLARYZACJI WKŁADEK ZBROJENIOWYCH

Streszczenie. Przedstawiono zasady badań polaryzacyjnych w rzeczywistych konstrukcjach żelbetowych. Omówiono praktyczne sposoby określania powierzchni polaryzowanej stali zbrojeniowej. Zamieszczono wyniki pomiarów potencjału polaryzowanej wkładki zbrojeniowej dla różnych elektrolitów. Stwierdzono zasadniczy wpływ rodzaju korozji na rozkład prądów polaryzacji.

ATTEMPT AT DETERMINING OF POLARIZATION RANGE OF REINFORCEMENT

Summary. The principles of polarization test in situ were shown. The practical way of definition of polarization area of reinforcement was discussed. The results of corrosion potential of polarizing reinforcing bar for different electrolytes were shown. A fundamental influence was found of kind corrosion for distribution of current lines.

1. Wprowadzenie

Trwałość konstrukcji budowlanych zależy od ich odporności na korozyjne oddziaływania otaczającego środowiska. Procesy korozyjne metalowych materiałów budowlanych mają charakter elektrochemiczny, dlatego też do poznania tych zjawisk próbuje się stosować techniki elektrochemiczne. Ponieważ tego typu badania mogą być wykonywane *in situ*, są nieniszczące oraz umożliwiają uzyskanie ilościowych informacji, wzbudzają coraz większe zainteresowanie osób wykonujących pomiary diagnostyczne w warunkach polowych. Do badań procesu korozji stali zbrojeniowej w betonie zostały zastosowane w różnym stopniu następujące metody elektrochemiczne: pomiary potencjału stacjonarnego, metoda polaryzacji liniowej, spektroskopia impedancyjna oraz techniki impulsowe [1].

Wśród wyżej wymienionych metod, najpowszechniej stosowany jest pomiar potencjału stacjonarnego, za pomocą którego uzyskuje się jedynie dane jakościowe [2]. Bardziej zaawansowanym pomiarem dostarczającym danych ilościowych jest polaryzacja liniowa. Za

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Adam Zybur, prof. PŚl.

granicą metodę polaryzacji wykorzystuje się do korozyjnego diagnozowania budowli [3]. Jednak warunki występujące na styku zbrojenia z betonem stwarzają utrudnienia w interpretacji wyników.

Celem pracy jest omówienie wybranych problemów pomiarowych i interpretacyjnych podczas badań polaryzacyjnych oraz przeprowadzonych pomiarów testujących wykonanej głowicy. Pomiarzy te umożliwiają oszacowanie zasięgu polaryzacji w zależności od sposobu aktywizowania powierzchni stali.

2. Charakterystyka badań polaryzacyjnych w elementach żelbetowych

Metoda polaryzacji polega na wyznaczeniu zależności między gęstością prądu polaryzacji narzuconego z zewnętrznego źródła prądu a potencjałem badanej elektrody metalicznej (w przypadku żelbetu - zbrojenia) mierzonego względem określonej elektrody odniesienia, $i_z = f(E)$. Obecnie pomiary wykonuje się za pośrednictwem automatycznego potencjostatu. Rejestrując dane polaryzacyjne przy potencjale korozyjnym można wyznaczyć rezystancję polaryzacyjną $R_p = (\partial E / \partial i)_{i=0}$. Równanie Sterna-Geary'ego [1] wiąże opór polaryzacji R_p z gęstością prądu korozji i_{kor}

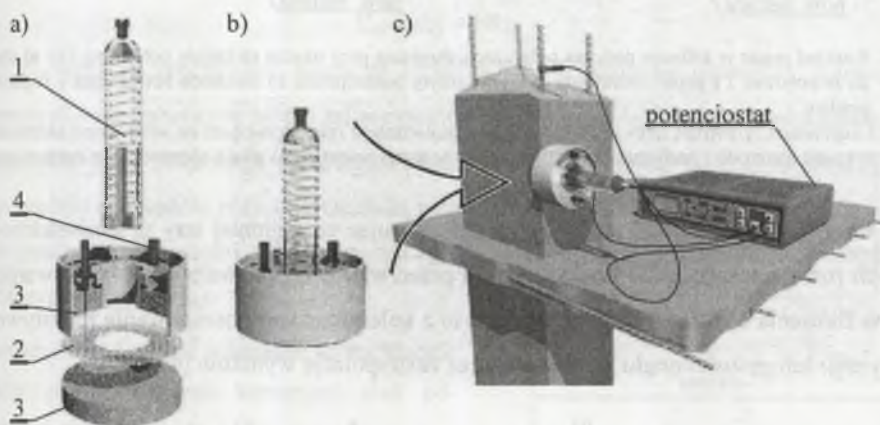
$$i_{kor} = \frac{b_a b_k}{2,303 (b_a + b_k) R_p} \quad (1)$$

gdzie: b_a , b_k – współczynniki Tafela reakcji anodowej i katodowej.

Zasadniczą cechą różniącą badania wykonywane w laboratoriach elektrochemicznych od badań na elementach żelbetowych jest usytuowanie elektrody odniesienia i elektrody pomocniczej umożliwiającej przepływ prądu i polaryzację zbrojenia. Podczas pomiarów w konstrukcjach obie elektrody muszą być przykładane do powierzchni betonu, co stwarza trudności z zapewnieniem kontaktu elektrycznego całego układu. Prawidłowe połączenie jest możliwe za pośrednictwem skonstruowanej głowicy przedstawionej na rys. 1a. Głowica ta zawiera elektrodę odniesienia chlorowo-srebrową 1 oraz elektrodę pomocniczą o kształcie pierścienia i wykonaną z siatki tytanowej pokrytej warstwą złota 2. Elektrodę pomocniczą 2 umieszczono między dwoma higroskopijnymi krążkami 3. Poprzez króciec 4 wprowadzany jest płyn kondukcyjny, który nasączając higroskopijne krążki umożliwia kontakt między elektrodą pomocniczą i odniesienia.

Stosowanie głowicy pomiarowej stwarza sytuację znacznie odbiegającą od warunków laboratoryjnych, gdzie mała elektroda badana o prostym kształcie współpracuje ze znacznie

większą elektrodą pomocniczą (przeciwelektrodą). W pomiarach połowych występują bardziej złożone warunki. Znacznie mniejsza przeciwelektroda działa na zbrojenie o wiele większej powierzchni, a ponadto należy oczekiwać nierównomiernego rozkładu gęstości prądu na powierzchni zbrojenia. Nierównomierny rozkład wywołuje prąd płynący jedynie przez fragment zbrojenia w pobliżu przeciwelektrody. Zaburzenia przepływu prądu powstające na styku zbrojenia z betonem znacznie komplikują interpretację wyników [1].

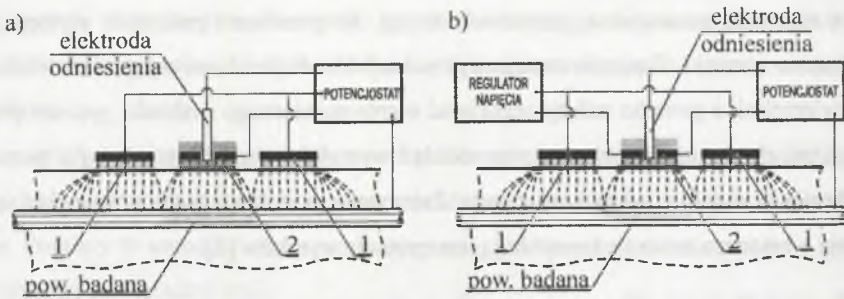


Rys. 1. Głowica pomiarowa: a) przekrój, b) widok, c) podczas badań polaryzacyjnych w konstrukcji żelbetowej
Fig. 1. The measuring head: a) section, b) view, c) during polarization test of the reinforcement in situ

Wyznaczona gęstość prądu korozji musi być odniesiona do zaktywizowanej elektrochemicznie części pola powierzchni zbrojenia. W rzeczywistości nie znany jest rozkład prądów polaryzacji, a tym samym polaryzowana powierzchnia zbrojenia. W literaturze spotyka się metody, które umożliwiają oszacowanie badanej powierzchni zbrojenia. Metody te można podzielić na dwie grupy.

Do pierwszej grupy zalicza się sposoby ograniczające przepływ prądu poza powierzchnię badaną poprzez zastosowanie elektrody zewnętrznej, umieszczonej wokół przeciwelektrody (rys. 2). Realizuje się dwa układy polaryzujące zbrojenie [3]:

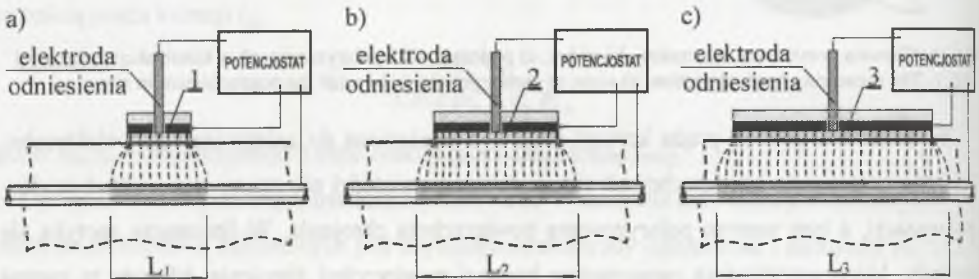
- elektroda zewnętrzna 1 (tzw. elektroda ochronna) polaryzuje prądem o tym samym potencjale jak elektroda główna 2 (rys. 2a);
- elektroda zewnętrzna 1 polaryzuje prądem o dobranej wartości w zależności od zamierzonego ograniczenia rozchodzenia się prądów polaryzacji (rys. 2b) [3, 5].



Rys. 2. Rozkład prądu w żelbecie podczas polaryzacji zbrojenia przy użyciu elektrody ochronnej [3]: a) elektroda zewnętrzna 1 i przeciwelektroda 2 z tym samym potencjałem, b) elektroda zewnętrzna 1 regulowana prądem

Fig. 2. Distribution of current lines in concrete during polarization reinforcing bars on used guard electrode [3]: a) guard electrode 1 and counter electrode 2 with the same potential, b) guard electrode 1 in current control

W drugiej grupie rozkład prądu określa się stosując co najmniej trzy przeciwelektrody o różnych rozmiarach (rys. 3). Większa liczba przeciwelektrod pozwala na polaryzowanie obszarów zbrojenia o różnej wielkości ($L_{1..3}$), a to z kolei umożliwia oszacowanie rezystywności polaryzacji lub gęstości prądu korozji, poprzez ekstrapolację wyników [4].



Rys. 3. Określanie zasięgu polaryzacji przy użyciu przeciwelektrod o różnych rozmiarach; a) pomiary przy użyciu najmniejszej przeciwelektrody 1, b) pomiary przy użyciu średniej przeciwelektrody 2, c) pomiary przy użyciu największej przeciwelektrody 3

Fig. 3. Determination of polarization range on used different sizes counter electrodes; a) measurement on used the smallest counter electrode, b) measurement on used medium counter electrode, c) measurement on used the biggest counter electrode

Omówione wyżej próby określenia powierzchni zbrojenia są niewystarczające, ponieważ w bardzo ograniczonym zakresie ujmują rozkład pola elektrycznego w układzie przeciwelektroda-beton-zbrojenie. Jak wspomniano wcześniej, rozkład ten zależy od powierzchni przeciwelektrody, jednak wpływają na niego również inne czynniki, takie jak: rezystancja otuliny betonowej oraz rezystancja polaryzacji na granicy faz beton-stal. Ponadto dodatkowe problemy stwarzają nierównomierność otuliny betonowej i proces korozji stali [1].

Rezystancję otuliny betonowej determinują dwa czynniki: odległość elektrody odniesienia od elektrody badanej (w przybliżeniu równa grubości otulenia betonowego) oraz wilgotność betonu wpływająca na przewodność elektryczną. Iloczyn rezystancji omowej R_{Ω} i prądu I jest omowym spadkiem potencjału ΔE [6]

$$\Delta E = I \cdot R_{\Omega} \quad (2)$$

Mierzony potencjał elektrodowy E_m jest więc równy sumie

$$E_m = E_{rz} + I \cdot R_{\Omega} \quad (3)$$

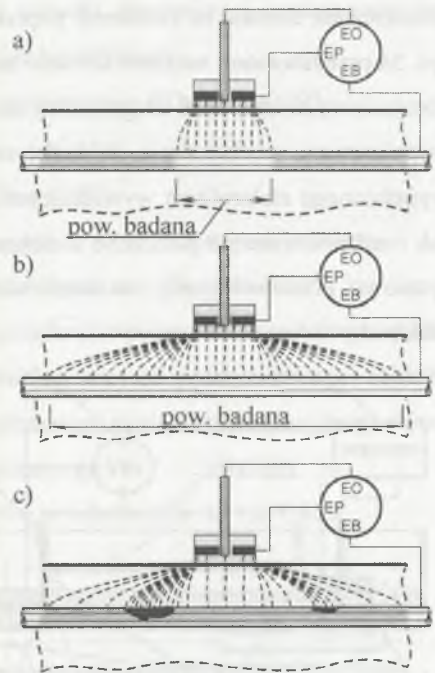
gdzie E_{rz} oznacza rzeczywisty potencjał elektrodowy. Rozbieżność pomiędzy potencjałem mierzonym i rzeczywistym zależy od rezystancji omowej R_{Ω} . Wpływ omowego spadku potencjału powoduje deformację przebiegów prądowo-potencjałowych, co w konsekwencji może prowadzić do błędów przy wyznaczaniu parametrów procesu korozyjnego z analizy krzywych polaryzacji (gęstości prądu korozyjnego, oporu polaryzacji, potencjału korozyjnego, współczynników Tafela).

Szczególnie istotne znaczenie w rozkładzie prądów polaryzacji ma korozyjny stan powierzchni zbrojenia [1].

Przy korozji ogólnej obszar oddziaływania prądu odpowiada w przybliżeniu polu powierzchni przeciw elektrody (rys. 4a). Można więc oszacować pole powierzchni polaryzowanego zbrojenia i wyznaczyć gęstość prądu korozji z równania (1).

Przy braku korozji (pasywność stali) następuje rozptył prądu na obszarze zbrojenia znacznie przekraczającym wymiary przeciw elektrody (rys. 4b). W tej sytuacji można posłużyć się metodami ograniczającymi rozchodzenie się prądów polaryzacji omawianymi w niniejszej pracy.

Przy korozji lokalnej (w obecności chlorków) prąd płynie głównie do obszarów anodowych, których pole powierzchni nie jest znane (rys. 4c). W takim przypadku wyznaczenie szybkości korozji stwarza znaczne trudności.



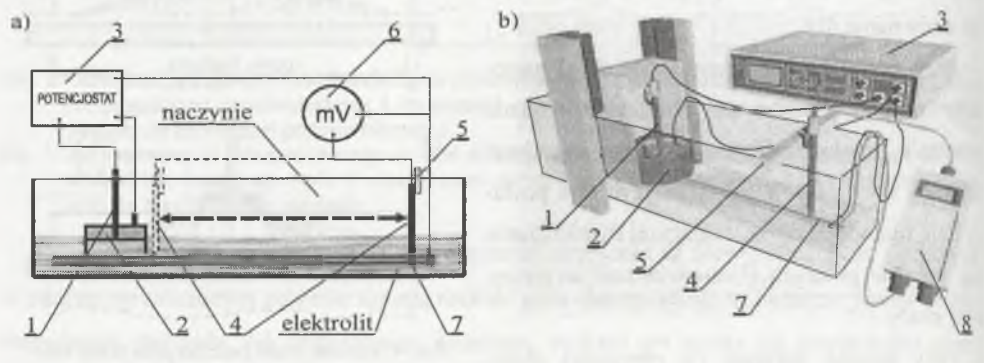
Rys. 4. Rozkład prądu podczas polaryzacji zbrojenia; a) dla korozji ogólnej, b) brak korozji, c) dla korozji lokalnej

Fig. 4. The current's redistribution during polarization of the reinforcement; a) for general corrosion, b) with out corrosion, c) for local corrosion

3. Zakres badań

Przeprowadzenie badań polaryzacyjnych za pomocą głowicy pomiarowej w rzeczywistych konstrukcjach żelbetowych wymaga przede wszystkim określenia zasięgu polaryzowanej powierzchni zbrojenia. Sposób polaryzowania wkładek zbrojeniowych jest uzależniony od rodzaju procesu korozji. Nieznajomość rozkładu prądów polaryzacji może być skutkiem wystąpienia „grubych” błędów w ocenie szybkości korozji.

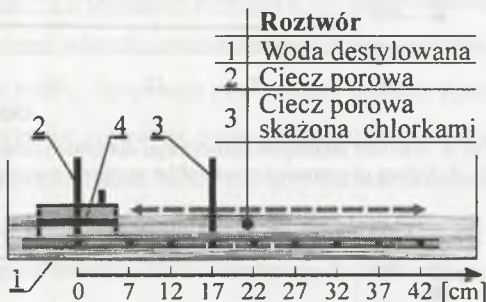
W celu określenia charakterystyki pomiarowej wykonanej głowicy pomiarowej, z uwzględnieniem przebiegu korozji elektrody badanej (wkładki zbrojeniowej), wykonano serię badań testujących. Schemat i widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 5. Elektroдами odniesienia były dwie elektrody chlorowo-srebrowe. Elektroda 1 została ustabilizowana w głowicy pomiarowej 2 i podłączona z potencjostatem 3. Z potencjostatem 3 połączona została także tytanowa przeciwelektroda głowicy pomiarowej 2. Elektroda odniesienia 4 umieszczona została na ruchomej poprzeczce 5 i podłączona z miliwoltomierzem 6. Na rys. 5a przedstawiono możliwe kierunki ruchu elektrody 4. Elektroda badaną 7 była wkładka zbrojeniowa ze stali St3S długości 500 mm i średnicy 14 mm stoczona do średnicy 12 mm i wypolerowana mechanicznie. Wkładkę umieszczono w pojemniku z tworzywa sztucznego wypełnionego elektrolitem wywołującym zakładany rodzaj korozji. Zarówno potencjostat 3, jak i miliwoltomierz 8 połączono z elektrodą badaną. Poziom elektrolitu sięgał powierzchni tytanowej przeciwelektrody, co umożliwiała kontakt elektryczny wszystkich zastosowanych elektrod.



Rys. 5. Stanowisko pomiarowe; a) schemat, b) widok
Fig. 5. Section of test's stand; a) diagram, b) view

4. Przebieg i wyniki badań

Pomiary potencjału korozyjnego wykonano na pojedynczej wkładce zbrojeniowej 1 (rys. 6). Elektroda odniesienia 2 (chlorowo-srebrowa) ustabilizowana w głowicy pomiarowej podczas badań znajdowała się w jednym miejscu w osi wkładki w pobliżu końca pręta. Elektroda odniesienia 3 (chlorowo-srebrowa) umocowana na ruchomej poprzeczce znajdowała się (podobnie jak elektroda 1) w osi wkładki, a jej położenie względem nieruchomej elektrody 2 zmieniło się w zakresie 7+42 cm, zwiększając je po każdym pomiarze potencjału o 5 cm.



Rys. 6. Sposób przeprowadzenia badań

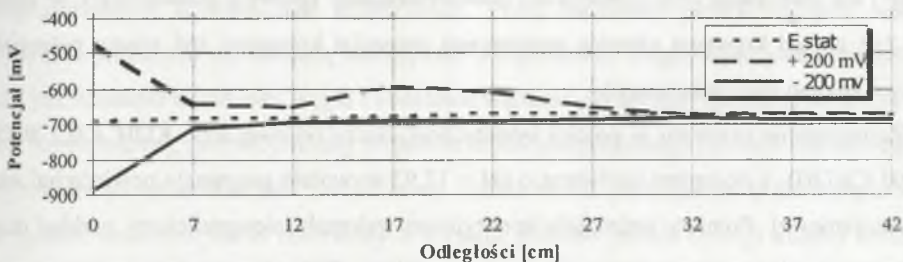
Fig. 6. The method of test

W celu zróżnicowania procesów korozji badanej wkładki zbrojeniowej zastosowano trzy roztwory, w których wykonywano pomiary potencjału korozyjnego:

- woda destylowana z dostępem powietrza ($H_2O + \text{rozpuszczone } CO_2$), $pH = 5,93$;
- syntetyczna ciecz porowa z dostępem powietrza –
– 0,06 KOH + 0,2 NaOH + 0,001 $Ca(OH)_2$, o $pH = 12,92$;
- syntetyczna ciecz porowa skażona chlorkami w stężeniu 3.1% z dostępem powietrza –
– 0,06 KOH + 0,2 NaOH + 0,001 $Ca(OH)_2 + KCl$ o stężeniu 6.5%, $pH = 12,77$.

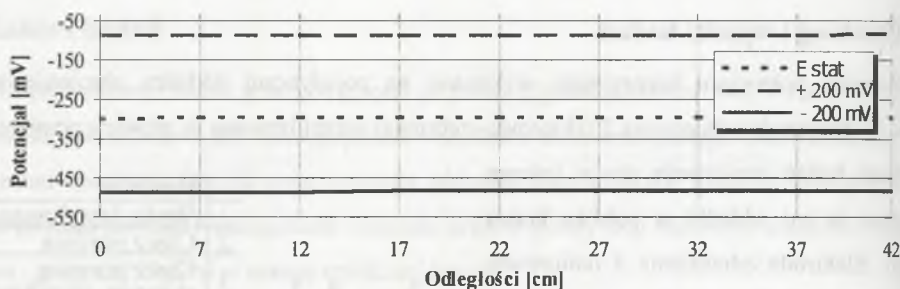
Dla ustalonego elektrolitu wykonywano 3 serie pomiarowe potencjału korozyjnego na długości wkładki zbrojeniowej, każdorazowo zmieniając wartość polaryzowanego napięcia przyłożonego do przeciwelektrody 4. Wartość przyłożonego napięcia polaryzacyjnego wynosiła -200 oraz $+200$ mV względem potencjału stacjonarnego.

Wyniki pomiarów dla poszczególnych elektrolitów przedstawiono na rys.7, 8, 9.

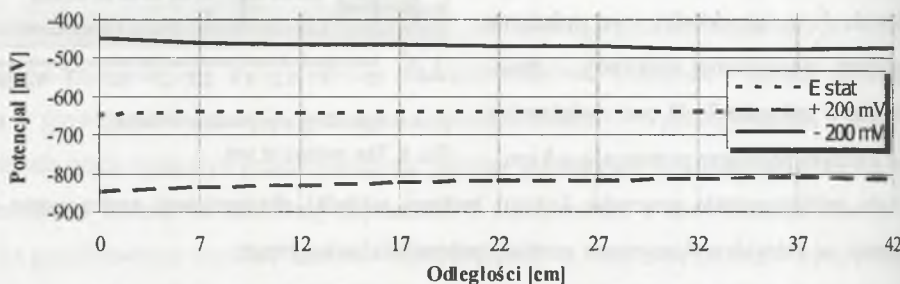


Rys. 7. Wartości potencjału korozyjnego dla wody destylowanej

Fig. 7. Values of corrosion potential for distil water



Rys. 8. Wartości potencjału korozyjnego dla syntetycznej cieczy porowej
 Fig. 8. Values of corrosion potential for synthetic pore water



Rys. 9. Wartości potencjału korozyjnego dla syntetycznej cieczy porowej skażonej chlorkami
 Fig. 9. Values of corrosion potential for synthetic pore water with chloride ions

5. Analiza wyników badań

Wyniki badań potencjału korozyjnego przy stosowaniu roztworów wywołujących różne rodzaje procesów korozji wykazały jednoznacznie, iż rozkład prądów polaryzacji zależy zasadniczo od sposobu i rodzaju korozji na powierzchni wkładki zbrojeniowej.

Zastosowanie elektrolitu w postaci wody destylowanej z dostępem powietrza ($H_2O + \text{rozpuszczone } CO_2$) wywołało korozję ogólną wkładki zbrojeniowej. Pomiar potencjału korozyjnego wykazały, iż zasięg prądów polaryzacji przy korozji ogólnej jest bardzo mały i nie przekracza pola powierzchni przeciwelektrody (główicy pomiarowej). W odległości 2÷5 cm od krawędzi główicy pomiarowej potencjał korozyjny był równy potencjałowi stacjonarnemu (bez polaryzacji).

Zastosowanie roztworu w postaci syntetycznej cieczy porowej 0,06 KOH + 0,2 NaOH + 0,001 $Ca(OH)_2$ z dostępem powietrza o $pH = 12,92$ wywołało pasywację powierzchni wkładki zbrojeniowej. Pomiar potencjału korozyjnego wykazały nieograniczony rozkład prądów polaryzacji, gdyż spolaryzowanie różnicą potencjałów +200 mV wywołało zmianę potencjału

na długości 35 cm równą 3 mV, natomiast spolaryzowanie różnicą potencjałów -200 mV wywołało zmianę potencjału na długości pręta rzędu 5 mV.

Zastosowanie roztworu w postaci syntetycznej cieczy porowej $0,06$ KOH + $0,2$ NaOH + $0,001$ Ca(OH)₂ skażonej chlorkami o stężeniu 3.1% z dostępem powietrza wywołało złożony rodzaj procesu korozji. Znaczna część powierzchni wkładki została spasywowana, natomiast można było także zaobserwować liczne drobne wżery. Pasywacja powierzchni wkładki z jednoczesnym wystąpieniem licznych drobnych wżerów wywołała pośredni rodzaj korozji między korozją ogólną a całkowitą pasywacją powierzchni stali. Miało to swoje odzwierciedlenie w wynikach pomiarów potencjału korozyjnego. Polaryzacja wkładki zbrojeniowej spowodowała wyraźną zmianę potencjału na całej długości wkładki, lecz z tendencją do obniżenia się wraz z oddalaniem się od przeciwelektrody. Różnice potencjałów wynosiły od 15 do 21 mV na długości wkładki, czyli były o ok. 4 razy większe niż przy całkowitej pasywacji powierzchni stali.

W zastosowanym sposobie wywołania korozji wżerowej nie uzyskano wyraźnych ognisk korozji, co bardzo utrudniło określenie wpływów głębokich wżerów na rozkład prądów polaryzacji. Jednakże na podstawie powyższych wartości potencjału korozyjnego można spodziewać się, że w cieczy porowej skażonej chlorkami wystąpienie dużych wżerów spowoduje znacznie zaburzenie rozkładu prądów polaryzacji. Związane z tym procesem niejednorodności znacznie utrudniają określenie polaryzowanej powierzchni wkładki zbrojeniowej.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary potencjału korozyjnego przy zastosowaniu różnych rodzajów elektrolitów wykazały, że rozkład linii pola elektrycznego zależy od sposobu aktywizowania powierzchni zbrojenia. Ma to szczególne znaczenie w przypadku pomiarów wykonywanych w eksploatowanych konstrukcjach żelbetowych. Przed badaniami polaryzacyjnymi należy więc określić przyczynę wywołującą korozję stali zbrojeniowej. Uogólniając, jeżeli przyczyną korozji jest działanie dwutlenku węgla i obniżenie wartości pH betonu, można spodziewać się korozji równomiernej, proporcjonalnej do powierzchni zubożonego otulenia betonowego – polaryzowana powierzchnia stali zbrojeniowej będzie równa powierzchni przeciwelektrody. W przypadku działania jonów chlorkowych wystąpi pośredni proces korozji między korozją ogólną a całkowitą pasywacją wkładek zbrojeniowych – powierzchnia polaryzacji będzie bardzo rozległa, co wymaga ograniczania powierzchni polaryzacji przez zastosowanie dodatko-

wych elektrod. Wyniki badań ukazują, że przy wykonywaniu badań w rzeczywistych konstrukcjach należy unikać wszelkiego rodzaju rys i pęknięć jako punktów przyłożenia elektrody odniesienia do określenia gęstości prądu korozyjnego (są to miejsca występowania ognisk korozji). Uzyskane w tych punktach wyniki gęstości prądu korozji będą trudne do interpretacji z powodu problemów z oszacowaniem polaryzowanej powierzchni zbrojenia.

LITERATURA

1. Królikowski A.: Elektrochemiczne badania korozyjne w budownictwie, IX Konferencja Naukowo-Techniczna „KONTRA'98” „Trwałość budowli i ochrona przed korozją”, Warszawa-Zakopane 1998.
2. Zybura A., Jaśniok T.: Diagnostyka stanu korozyjnego zbrojenia w żelbetowych obiektach komunalnych, Drogownictwo nr 4, 2000, s.109-116.
3. Flis J.: Ocena szybkości korozji stalowego zbrojenia metodą elektrochemiczną, Ochrona przed korozją nr 8, 1996, s.201-205.
4. Gonzalez J.A., Benito M., Feliu S., Rodriguez P., Andrade C.: Suitability of Assessment Methods for Identifying Active and Passive Zones in Reinforced Concrete, Corrosion-Vol.51, No.2, 1995.
5. Feliu S., Gonzalez J.A., Feliu S. Jr., Andrade M. C.: Confinement of the Electrical Signal for In Situ Measurement of Polarization Resistance in Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, V. 87-M47, 1990.
6. Królikowski A., Kołodziejczyk K.: Problemy pomiarowe przy rejestracji krzywych polaryzacji, Konferencja Naukowo-Techniczna „Współczesne metody badań i ochrony materiałów przed korozją”, Wrocław 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Grzegorz Wieczorek

Abstract

The corrosion potential tests of reinforcement bar in different electrolytes show the redistribution of current lines depending on kind of corrosion. For general corrosion the size of polarization area of reinforcement bar is the same size so area of center electrode. For complex corrosion the size of polarization area is a very big. We must delimit the polarization area for correctness of measurement. This conclusion is very important for polarization test in situ.