

Tomasz JAŚNIOK*
Politechnika Śląska

WPLYW KOROZYJNEGO STANU POWIERZCHNI ZBROJENIA NA ROZKŁAD PRĄDÓW POLARYZACJI

Streszczenie. Przedstawiono metodę oporu polaryzacji zastosowaną do określenia stopnia rozwoju korozji zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Omówiono czynniki wpływające na poprawność pomiarów. Zamieszczono wyniki własnych badań gęstości prądu korozyjnego w elementach próbnym. Oszacowano zasięg polaryzacji powierzchni wkładek zbrojeniowych na podstawie przeciwelektrod o różnych rozmiarach. Stwierdzono zasadniczy wpływ rodzaju korozji na rozkład prądów polaryzacji.

INFLUENCE OF CORROSION'S CONDITIONS OF REINFORCEMENT'S SURFACE ON DISTRIBUTION OF POLARISATION CURRENTS

Summary. The paper discusses the method of polarization resistance in reinforced concrete structures. The different factors which influence the accuracy of measurements of polarization resistance were present and explained. The results of corrosion current density in reinforced concrete beam were shown. Polarization area of reinforcement through using difference sizes of counter electrodes was estimated. A fundamental influence of specific kind of corrosion on distribution of current lines transpired from the examination.

1. Wprowadzenie

Trwałość konstrukcji żelbetowych może zostać poważnie ograniczona w wypadku wystąpienia korozji zbrojenia. Korozja wkładek zbrojeniowych powoduje zmniejszenie przekrojów prętów, ograniczenie plastyczności stali, a powstające na powierzchni wkładek zbrojeniowych produkty korozji mogą doprowadzić do zarysowania i odspojenia otulenia betonowego, a następnie utraty przyczepności stali z betonem [1]. Uszkodzenia te powodują obniżenie nośności elementów żelbetowych i dlatego konieczna jest naprawa lub w poważniejszych przypadkach rozbiórka i rekonstrukcja fragmentów uszkodzonych. Wczesne wykrycie aktywnych

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Adam Zybura, prof. Politechniki Śląskiej

powierzchni zbrojenia umożliwia szybkie przedsięwzięcie środków przeciwdziałających znacznieszym uszkodzeniom konstrukcji.

Procesy korozyjne stali w betonie mają charakter elektrochemiczny i z tego powodu do monitorowania tych zjawisk stosowane są techniki wywodzące się z elektrochemii [2]. Najczęściej wykonuje się pomiary potencjału stacjonarnego i rezystywności otulenia betonowego, uzyskując jednak dane trudne do interpretacji. Jedynie techniki stało- lub zmiennoprądowe, umożliwiające określenie oporu polaryzacji R_p lub gęstości prądu korozyjnego i_k , pozwalają ustalić szybkość korozji z dokładnością porównywalną z konwencjonalnymi metodami wagowymi i analitycznymi [1].

Celem pracy jest przedstawienie problemów pomiarowych i interpretacyjnych badań polaryzacyjnych w elementach żelbetowych oraz przeprowadzenie badań doświadczalnych oszacowania zasięgu polaryzacji prętów zbrojeniowych w zależności od sposobu aktywizowania powierzchni stali.

2. Zastosowanie metody oporu polaryzacji do badania zbrojenia w elementach żelbetowych

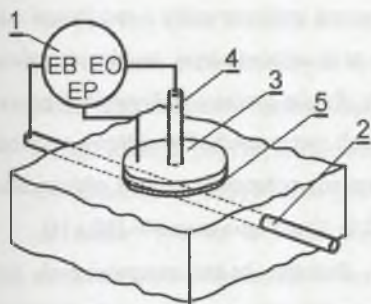
Pomiar oporu polaryzacji jest elektrochemiczną metodą stałoprądową, która pozwala na określenie szybkości korozji stali zbrojeniowej osłoniętej betonem [3]. Szybkości korozji wyznacza się na podstawie przebiegu krzywej polaryzacji w zakresie liniowym przy małych wartościach przyłożonego napięcia polaryzującego. Krzywa polaryzacji ujmuje zależności prądowo-potencjałowe badanej elektrody, a nachylenie tej krzywej przy potencjale korozyjnym określa opór polaryzacji [3]

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

Równanie Sterna-Geary'ego wiąże opór polaryzacji R_p z gęstością prądu korozyjnego i_k za pośrednictwem stałej B , zależnej od tzw. współczynników Tafela reakcji anodowej b_a i reakcji katodowej b_k [4]

$$i_k = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

$$B = \frac{b_a b_k}{2,303(b_a + b_k)} \quad (3)$$



Rys. 1. Układ pomiarowy wykorzystujący metodę polaryzacji liniowej

Fig. 1. The measurement system for linear polarisation technique

Badania polaryzacji liniowej w konstrukcjach żelbetonowych realizowane są w układzie trójelektrodowym z zastosowaniem potencjostatu / (rys. 1).

Elektrodą badaną jest zbrojenie 2 elementu żelbetonowego. Na powierzchni betonu konstrukcji umieszcza się dodatkową elektrodę (przeciwelektrodę) 3 umożliwiającą przepływ prądu do stali zbrojeniowej. Zwykle stosuje się pierścieniowe elektrody wykonane z metalu odpornego na korozję, umieszczone w głowicy pomiarowej [2].

Elektroda odniesienia 4 jest usytuowana centralnie względem przeciwelektrody i charakteryzuje się dobrze znanym i dobrze odwracalnym potencjałem. Kontakt elektryczny, a tym samym możliwość polaryzacji zbrojenia, zapewnia przekładka 5 nasączona elektrolitem.

Zastosowanie polaryzacji liniowej w dowolnych systemach korozyjnych wymaga analizy:

- wpływu spadku potencjału między elektrodą badaną a elektrodą odniesienia,
- zakresu liniowego przebiegu zależności prądowo-potencjałowych,
- miarodajności uzyskiwanych wyników,
- rozkładu linii pola elektrycznego.

Spadek potencjału między elektrodą badaną a elektrodą odniesienia jest spowodowany znaczną odległością między nimi. Dystans ten wraz z wilgotnością determinują rezystywność otuliny betonowej R_{Ω} . Iloczyn rezystancji omowej R_{Ω} i prądu I jest omowym spadkiem potencjału ΔE . Mierzony potencjał elektrodowy E_m jest zatem równy [2]:

$$E_m = E_{rz} + \Delta E, \quad \Delta E = I \cdot R_{\Omega} \quad (4)$$

gdzie E_{rz} jest rzeczywistym potencjałem elektrody.

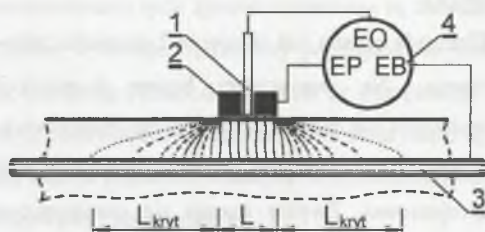
Wpływ R_{Ω} powoduje deformację przebiegów prądowo-potencjałowych, co w konsekwencji może prowadzić do błędów przy wyznaczaniu szybkości korozji [2]. Problem ten ma coraz mniejsze znaczenie w wyniku elektronicznej kompensacji IR będącej standardowym wyposażeniem obecnych urządzeń pomiarowych [3].

Liniowy przebieg zależności prądowo-potencjałowych przy rejestracji krzywych polaryzacji jest spełniony w zakresie potencjałów różniących się od potencjału korozyjnego około 20 - 30 mV w kierunku dodatnim i ujemnym [4].

Miarodajność uzyskiwanych wyników oznacza, że są one porównywalne z rezultatami metod konwencjonalnych. Warunek ten jest zachowany przy odpowiedniej szybkości zmiany potencjału w trakcie pomiarów dynamicznych lub przy długim czasie oczekiwania w pomiarach statycznych. Prawidłowa szybkość zmiany potencjału wynosi odpowiednio

$2.5 \div 10 \text{ mV/min}$ oraz $30 \div 100 \text{ s}$ [4].

Podczas badań rzeczywistych elementów żelbetowych za pośrednictwem głowicy pomiarowej i przeciwelektrody o małej powierzchni następuje polaryzacja jedynie części elektrody badanej (pręta zbrojeniowego) – rys. 2. Występujący układ pomiarowy powoduje wzrost niejednorodności rozkładu linii pola elektrycznego, a także sprzyja ten-



Rys. 2. Rozkład linii pola elektrycznego zanikającego wraz z odległością od przeciwelektrody; 1 – elektroda odniesienia, 2 – przeciwelektroda, 3 – pręt zbrojeniowy, 4 – potencjostat [4]

Fig. 2. The electrical field lines vanish proportionally to distance from a counter electrode; 1 – a reference electrode, 2 –

tencji do zanikania polaryzacji pręta wraz ze zwiększeniem się odległości od przeciwelektrody. W pracach [3, 4] używa się pojęcia „odległości krytycznej” L_{kryt} , w obrębie której powierzchnia elektrody badanej jest rzeczywiście polaryzowana [4]. Odległość krytyczna ma wartość zmienną, zależną od wielu wewnętrznych czynników.

3. Zasięg polaryzacji prętów zbrojeniowych

Zasięg polaryzacji prętów zbrojeniowych oraz przebieg linii pola elektrycznego w otulinie betonowej zależą od rodzaju i stopnia skorodowania powierzchni zbrojenia, rezystywności omowej betonu i powierzchni przeciwelektrody [2, 4].

Stopień skorodowania powierzchni zbrojenia charakteryzuje zarówno zaawansowanie procesów korozyjnych (szybkość korozji), jak i rodzaj zniszczeń korozyjnych. Zniszczenia korozyjne można podzielić na trzy grupy, różniące się sposobem dystrybucji linii pola elektrycznego [2]. Jeżeli występuje:

- korozja ogólna: obszar oddziaływania prądu I równy długości L w przybliżeniu odpowiada długości przeciwelektrody - rys. 3a; w tym przypadku można oszacować pole polaryzowanego zbrojenia i wyznaczyć szybkość korozji;

- stan pasywny (brak korozji): dochodzi do rozplywu prądu na obszarze zbrojenia l o długości L znacznie przekraczającym wymiary przeciwelektrody - rys. 3b. W tej sytuacji można posłużyć się metodami ograniczającymi polaryzowany obszar zbrojenia;

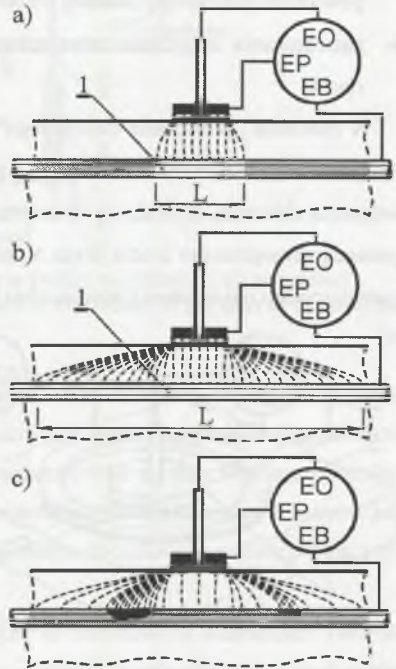
- korozja lokalna: prąd płynie głównie do obszarów anodowych, których pole powierzchni nie jest znane - rys. 3c. W takim przypadku wyznaczenie szybkości korozji stwarza trudności.

Rezystancja omowa betonu ma znaczny wpływ na rozkład linii pola elektrycznego. Wpływ ten maleje jedynie w warunkach korozji lokalnej z powodu dużych zaburzeń w przebiegu linii pola wywołanych przez obszary anodowe (rys. 3c).

Błąd spowodowany przyjęciem do obliczeń szybkości korozji powierzchni prętów znajdujących się bezpośrednio pod geometrycznym rzutem przeciwelektrody zmniejsza się wraz ze wzrostem jej powierzchni [4]. Zbieżność ta wynika z faktu, że wymiar nieuwzględnionej spolaryzowanej powierzchni zbrojenia L_{kryt} (rys. 2) nie zależy od powierzchni elektrody pomocniczej, ale jest funkcją rezystancji betonu R_D i oporu polaryzacji R_p . Używanie dużych przeciwelektrod może tylko ewentualnie zmniejszyć błąd w określeniu polaryzowanej powierzchni zbrojenia.

Bezpośrednio uzyskane podczas pomiarów w elementach żelbetowych opór polaryzacji R_p lub gęstość prądu korozyjnego i_k przy założonych powierzchniach elektrod stanowią wartości pozorne. Wartości te nie mogą być użyte do ilościowych analiz trwałości konstrukcji. Otrzymanie „prawdziwej” wartości R_p i i_k musi być poprzedzone zastosowaniem pewnych metod szacujących polaryzowaną powierzchnię zbrojenia lub ograniczających rozchodzenie się prądów polaryzacji. Proponuje się następujące rozwiązania [4]:

- kalkulowanie bocznego zasięgu prądu (L_{kryt}) za pomocą modelu elektrycznego lub matematycznego;

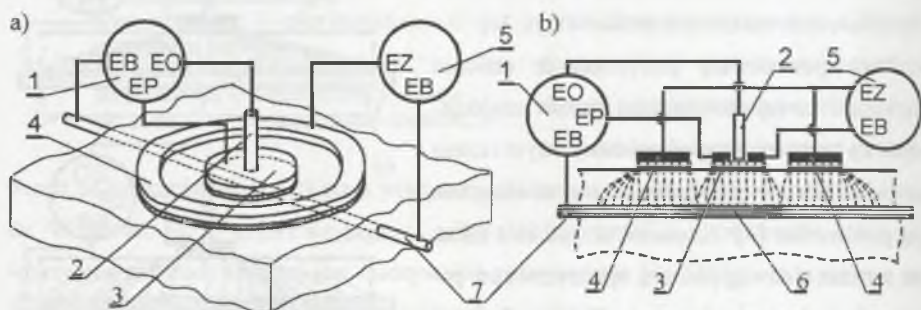


Rys. 3. Rozkład prądu podczas polaryzacji zbrojenia; a) dla korozji ogólnej, b) brak korozji, c) dla korozji lokalnej

Fig. 3. The current's redistribution during polarization of the reinforcement; a) for general corrosion, b) with out corrosion, c) for local corrosion

- minimalizowanie wpływu odległości krytycznej L_{kryt} przez przyjmowanie w pomiarach kolejno coraz większych przeciw elektrod, uzyskane szybkości korozji przy różnych spolaryzowanych powierzchniach ekstrapoluje się do wartości odpowiadającej nieskończonej powierzchni elektrody badanej (w takim wypadku wpływ L_{kryt} jest pomijalny);
- zastosowanie urządzenia zewnętrznego tzw. „pierścienia ochronnego” („guard ring”) – rys. 4.

W metodzie „pierścienia ochronnego”, oprócz układu pomiarowego składającego się z potencjostatu 1, elektrody odniesienia 2 oraz elektrody pomocniczej 3, wykorzystuje się zewnętrzną elektrodę obwodową 4, umieszczoną wokół elektrody pomocniczej. Elektroda ta za pomocą zewnętrznego źródła prądu 5 polaryzuje prądem o dobranej wartości, w zależności od zamierzonego ograniczenia powierzchni badanej 6 wkładki zbrojeniowej 7.



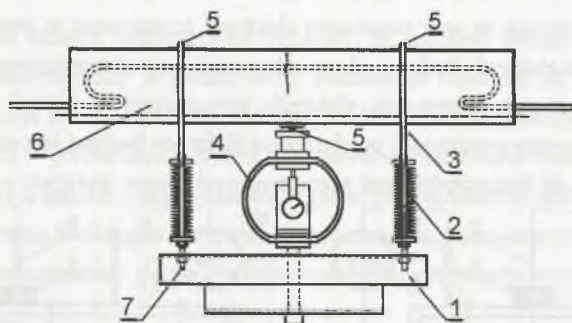
Rys. 4. Ograniczenie rozchodzenia prądów za pomocą metody „pierścienia ochronnego”; a) widok stanowiska, b) rozkład prądów polaryzacji

Fig. 4. Confinement of the current distribution by “guard ring”; a) a view of a test stand, b) distribution of polarisation current

4. Zakres i technika badań polaryzacji zbrojenia

Badania zasięgu polaryzacji przeprowadzono na żelbetowych elementach próbnych o wymiarach $5 \times 10 \times 60$ cm, zbrojonych jednym prętem o średnicy 6 mm i stali St3S; grubość otulenia wyniosła 2,0 cm. W elementach dodatkowo umieszczono tytanowy drut platynowany stanowiący w czasie badań potencjodynamicznych jedną z elektrod pomocniczych. Trzy elementy (o numerach 1, 2, 3) obciążano przez cały czas badań siłą skupioną, realizując moment maksymalny w środku rozpiętości belki. Obciążenie przekazywano wykonanym indywidualnie układem ciągnowo-belkowym (rys. 5). Układ składał się z belki stalowej 1, z którą połączono za pośrednictwem sprężyn 2 ciągną prętowe 3. Siłomierz 4 oparto na wałkowym łoży-

sku 5 odizolowanym od elementu próbnego 6 podkładkami z teflonu. Wzrost siły następował w wyniku obrotu nakrętek 7.



Rys. 5. Schemat układu obciążającego wywołującego rysę w środku rozpiętości belki żelbetowej
Fig. 5. The load system diagram (the system causes a crack in the middle of the span of the concrete beam)

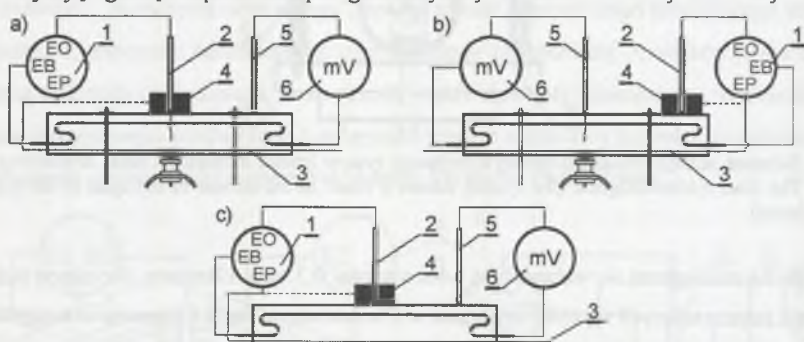
W strefie rozciąganej wywołano rysę o rozwarości 0,3 mm. Elementy obciążone poddano działaniu powtarzających się cykli zwilżania w 3% roztworze NaCl i suszeniu w temperaturze pokojowej. Zwilżanie trwało 3,5 godziny, natomiast suszenie 68,5 godzin. Pomiaru kontrolne wykonywano po każdym cyklu nawilżania aż do stwierdzenia zaawansowania procesów korozyjnych. Przyjęto, że procesy korozyjne w rysie elementu obciążonego rozwinęły się przy prądzie korozyjnym $i_k \approx 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ – por [4].

Badania potencjodynamiczne przeprowadzono także na żelbetowych elementach kontrolnych (nr 4, 5, 6) nieobciążonych, niezarysowanych i nie poddanych wpływowi środowiska agresywnego.

5. Przebieg i wyniki badań polaryzacji zbrojenia

Badania potencjodynamiczne wykonano w układzie trójelektrodowym przy użyciu potencjostatu firmy Gamry 1 (rys. 6). Główną kalomelową elektrodę odniesienia 2 umieszczano na powierzchni elementu próbnego w osi zbrojenia, przyjmując położenie punktów pomiarowych w belkach zarysowanych: środek rozpiętości belki (rys. 6a) i część skrajna belki (rys. 6b), natomiast w belkach nieobciążonych: środek rozpiętości belki (rys. 6c). Elektrodamy pomocniczymi były zarówno tytanowy drut zabetonowany w elemencie próbnym 3, jak i tytanowa siatka pokryta warstewką złota 4 umieszczona w indywidualnie skonstruowanej głowicy pomiarowej, przykładanej do powierzchni elementu próbnego. Głowicę pomiarową z elektrodą pomocniczą 4 umieszczano w miejscach usytuowania głównej elektrody odniesienia 2.

Dodatkowo, drugą kalomelową elektrodę odniesienia 5, połączoną z miliwoltomierzem 6, przykładano do powierzchni elementu próbnego w osi zbrojenia w miejscach przedstawionych na rys. 6. Założono, że przy stosowaniu elektrody pomocniczej w postaci drutu tytanowego powierzchnia elektrody badanej odpowiada części pręta zbrojeniowego stykającej się z betonem. Natomiast przy stosowaniu elektrody pomocniczej w postaci siatki tytanowej umieszczonej w głowicy pomiarowej powierzchnia elektrody badanej jest równa powierzchni pręta znajdującego się bezpośrednio pod geometrycznym rzutem elektrody siatkowej.



Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego: a) pomiary w rysie w belce obciążonej, b) pomiary przy krawędzi belki obciążonej, c) pomiary w środku rozpiętości w belce nieobciążonej

Fig. 6. The diagram of the test's stand: a) measurements in the crack in the load beam, b) measurements on the edge of the load beam, c) measurements in the middle of the span of the beam no load

Wyniki pomiarów zestawiono w tabelicy 1. W celach porównawczych zamieszczono także wartości gęstości prądu korozyjnego określone przy założeniu jednostkowej powierzchni elektrody badanej za pośrednictwem obu rodzajów przeciwelektrod.

Wyniki badań polaryzacyjnych elementów próbných

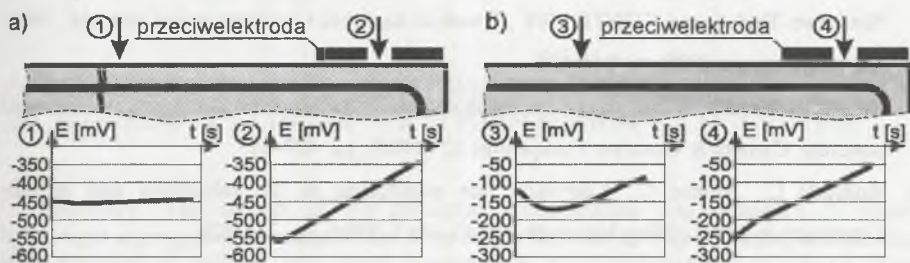
Tabela 1

Przeciwelektroda									
Punkt pomiarowy	Nr belki	i_k [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	R_p [$\text{k}\Omega\text{cm}^2$]	i_k [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	R_p [$\text{k}\Omega\text{cm}^2$]	i_k [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	R_p [$\text{k}\Omega\text{cm}^2$]	i_k [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	R_p [$\text{k}\Omega\text{cm}^2$]
	1	0,94	24,28	7,86	5,77	151,5	0,151	148,1	0,306
	2	0,95	22,40	7,76	4,53	153,4	0,139	146,2	0,240
	3	1,07	23,97	8,07	5,61	172,0	0,149	152,0	0,298
	1	0,41	49,33	1,92	16,58	65,9	0,307	36,2	0,880
	2	1,09	32,76	3,86	14,54	175,3	0,204	72,7	0,772
	3	0,63	36,01	3,85	8,67	101,3	0,224	72,5	0,460
	4	0,003	1684,75	0,236	58,54	0,4	10,478	4,4	3,107
	5	0,067	180,79	1,117	28,02	10,8	1,124	21,0	1,487
	6	0,090	134,19	0,854	34,02	14,5	0,835	16,1	1,806
Powierzchnia WE		160,79 cm^2		18,84 cm^2		1 cm^2		1 cm^2	

6. Analiza wyników badań

Przeprowadzone badania polaryzacyjne wykazały, że szybkość korozji określona za pośrednictwem przeciwelektrody w postaci drutu tytanowego różni się od szybkości korozji ustalonej przy użyciu przeciwelektrody siatkowej umieszczonej w głowicy pomiarowej. Zastosowanie głowicy w porównaniu z drutem tytanowym spowodowało występowanie gęstości prądu korozyjnego i_k prawie o rząd większej w rysie, pięciokrotnie większej poza rysą oraz około piętnastokrotnie większej w zbrojeniu spasywowanym. Różnice wyników zostały spowodowane niedoszacowaniem polaryzowanej powierzchni pręta przy zastosowaniu głowicy pomiarowej.

Pomijając wpływ lokalnych stref anodowych orientacyjnie określono zasięg prądów polaryzacji na podstawie wartości oporu polaryzacji R_p wyznaczonego za pośrednictwem obu typów przeciwelektrod przy założeniu jednostkowej powierzchni elektrody badanej WE – tablica 1. Iloraz wartości R_p stanowił część powierzchni wkładki zbrojeniowej polaryzowanej podczas badań potencjodynamicznych. Ustalono, że podczas pomiarów w rysie polaryzowana powierzchnia wkładki zbrojeniowej wynosiła 50% całej powierzchni pręta stykającego się z betonem. Jednak wartość ta może nie być miarodajna z powodu znaczącego wpływu lokalnej korozji na rozkład prądów polaryzacji. W wypadku pomiarów poza rysą powierzchnia polaryzowana osiągnęła 1/3 całej powierzchni pręta, a wkładki spasywowane były polaryzowane na 60% powierzchni elektrody badanej.



Rys. 7. Zmiany potencjału podczas badań polaryzacyjnych z użyciem głowicy pomiarowej na końcu belki żelbetowej: a) pomiary na belce zarysowanej, b) pomiary na belce bez rysy

Fig. 7. The change of potential during polarisation tests with used measurement head on the edge of the beam: a) the measurement on the cracking beam, b) the measurement on the beam without a crack

Oszacowany zasięg prądów polaryzacji potwierdzają wyniki zmiany potencjału stacjonarnego uzyskane za pomocą dodatkowej elektrody odniesienia przykładanej do powierzchni elementów próbnych podczas badań polaryzacyjnych (patrz rys. 6). Na rys. 7 przedstawiono zmiany potencjału podczas badań polaryzacyjnych w punkcie pomiaru i w środku belki. Można zauważyć, że prądy polaryzacji praktycznie nie docierały do punktu pomiarowego

usytuowanego w środku rozpiętości belki przy zaawansowanej korozji – rys. 7a, natomiast przy spasywowanym pręcie wpływ prądów polaryzacji w środku belki był znaczny – rys. 7b.

7. Podsumowanie

Wyniki badań potwierdziły, iż zasadniczy wpływ na rozkład prądów polaryzacji ma korozyjny stan powierzchni zbrojenia. Porównując opory polaryzacji uzyskane przy równomiernym spolaryzowaniu zbrojenia oraz spolaryzowaniu odcinkowym, można oszacować miarodajną powierzchnię pomiarową. Jednak dokładniejsze badania wymagają zastosowania głowicy pomiarowej z tzw. „ringiem ochronnym”, który umożliwi zniwelowanie wpływu rodzaju procesów korozyjnych.

LITERATURA

1. Andrade C., Alonso C.: On-site measurements of corrosion rate of reinforcement, *Construction and Building Materials* 15/2001, pp. 141-145.
2. Królikowski A.: Elektrochemiczne badania korozyjne w budownictwie, IX Konferencja Naukowo-Techniczna KONTRA'98 „Trwałość budowy i ochrona przed korozją”, Warszawa-Zakopane 1998, str. 215-222.
3. Song G.: Theoretical analysis of the measurement of polarisation resistance in reinforced concrete, *Cement & Concrete Composites* 22 (2000), pp. 407-415.
4. Andrade C., Alonso C.: Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site, *Construction and Building Materials* Vol.10, No.5, 1996, pp. 315-328.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Józef Kubicki

Abstract

The polarization test results confirm thesis included in this paper that fundamental influence on distribution of current lines is due to corrosion's conditions of reinforcement's surface. The only method permitting reliable measurement surface is delimiting of distribution polarization current by “guard ring”. This method is insensitive to kind of corrosion process.