TOMASZ JAŚNIOK MARIUSZ JAŚNIOK

Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska

DOI: 10.15199/40.2019.8.1

Wpływ usytuowania elektrod w układzie trójelektrodowym na wyniki badań polaryzacyjnych stali zbrojeniowej w wyciętych z konstrukcji rdzeniach betonowych

Effects of electrodes location in a three-electrode system on polarization measurements of reinforcing steel in concrete cores drilled from a structure

W pracy przedstawiono wyniki polaryzacyjnych badań stałoprądowych wykonywanych na fragmentach prętów zbrojeniowych znajdujących się w wyciętych z konstrukcji żelbetowych rdzeniach. W pierwszym etapie badań zastosowano tradycyjny układ trzech elektrod, w którym elektrodą badaną był pręt zbrojeniowy w walcowym rdzeniu, elektrodą pomocniczą krążek blachy ze stali trudnordzewiejącej, a elektrodą odniesienia klasyczna Ag, AgCI | CI⁻ w korpusie szklanym. Elektrody pomocnicza i odniesienia były przykładane do płaskiej powierzchni próbki przez wilgotną podkładkę filcową lub żel przewodzący. W drugim etapie badań zastosowano alternatywny układ elektrod, w którym elektrodą pomocniczą była powłoka lakieru z dodatkiem proszku srebra naniesiona na pobocznicę próbki, a pręt grafitowy osadzony w próbce wykorzystywano jako elektrodę odniesienia. Wyniki badań w warunkach powietrzno-suchych wykazały, że tradycyjne - elektrody przykładane do powierzchni betonu powodują duże zaburzenia wyników uniemożliwiające ich analizę, natomiast elektrody na stałe osadzone w betonie w tych samych warunkach wilgotnościowych pozwalają uzyskać zadawalające rezultaty.

<u>Słowa kluczowe</u>: konstrukcje żelbetowe, beton, stal zbrojeniowa, korozja zbrojenia, diagnostyka, badania polaryzacyjne, pomiary LPR

1. Wprowadzenie

Najlepszym rozwiązaniem umożliwiającym określenie zaawansowania procesów korozyjnych stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetowych jest metoda ciągłego monitorowania. Obecnie podczas wykonywania konstrukcji żelbetowych możliwe jest umieszczenie w szalunku przed betonowaniem czujników pomiarowych, które pozwalają na wykonywanie w dowolnym momencie badań metodami elektrochemicznymi (metodą oporu polaryzacji lub impulsu galwanostatycznego). Dodatkowo mierzy się temperaturę, opor-

This article describes results from d.c. polarization measurements of rebar fragments in concrete cores drilled from a structure. In the first stage of tests, a traditional arrangement of three electrodes was applied, in which the working electrode was the rebar in a cylindrical core, the counter electrode was a stainless steel disk, and the reference electrode was a traditional Ag, AgCl | Cl^- electrode in a glass body. The counter and reference electrodes were applied to a flat surface of the specimen covered with a wet felt washer or conductive gel. In the second stage of tests, an alternative electrode setup was used, in which the reference electrode was covered with the varnish and silver powder additive present on the specimen side surface, and a graphite rod in the specimen was used as the reference electrode. Results from tests performed under dry air conditions indicated that traditional electrodes applied to concrete surface caused significant discrepancies in results, and consequently their analysis became impossible. And electrodes permanently embedded into concrete provided satisfactory results for tests under the same conditions.

<u>Keywords</u>: RC-structures, concrete, reinforcing steel, corrosion of reinforcement, diagnosis, polarization measurements, LPR measurements

1. Introduction

The method of continuous monitoring is the best solution for determining the development stage of corrosion process of reinforcing steel in reinforced concrete structures. In the present methods of erecting reinforced concrete structures, measurement sensor can be placed in the formwork before cementation. Such sensors can perform measurements by electrochemical methods (polarization resistance or galvanostatic pulse) at any moment of testing. Additionally, these sensors can measure temperature, con-

dr inż. Tomasz Jaśniok – adiunkt w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej, absolwent Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w diagnostyce korozyjnej konstrukcji żelbetowych metodami elektrochemicznymi.

Dr inż. Tomasz Jaśniok [PhD. Eng.] – assistant professor in the Department of Building Structures at the Silesian University of Technology, a graduate of the Faculty of Civil Engineering. He specializes in corrosion diagnostics of reinforced concrete structures by electrochemical methods.

E-mail: tomasz.jasniok@polsl.pl

dr hab. inż. Mariusz Jaśniok, profesor nadzwyczajny w Politechnice Śląskiej, absolwent Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Zajmuje się zaawansowaną diagnostyką korozyjną konstrukcji żelbetowych metodami elektrochemicznymi, ochroną powłokową zbrojenia, a także elektrochemicznymi metodami regeneracji betonu.

Dr hab. inż. Mariusz Jaśniok – Associate Professor at the Silesian University of Technology, graduated from the Department of Building Structures at the Silesian University of Technology. The author specializes in advanced diagnostic techniques for reinforced concrete structures using electrochemical methods, coating protection for reinforcement, and electrochemical methods of concrete rehabilitation.

E-mail: mariusz.jasniok@polsl.pl.

Otrzymano / Received: 19.06.2019. Przyjęto / Accepted: 8.07.2019.





Fig. 1. The method of conducting tests on reinforcement corrosion rate in reinforced concrete structures acc. to [10] : a) exposure of cores drilled from the structure in the climatic chamber, b) a measurement system used in electrochemical tests

ność betonu, odczyn betonu, stężenie jonów chlorkowych, a nawet zawartość tlenu [2-5, 9]. Znacznie trudniejsza jest ocena zaawansowania procesów korozyjnych zbrojenia w istniejących konstrukcjach betonowych, w których zastosowanie czujników monitorujących korozję jest bardzo utrudnione. Najczęściej w praktyce wykonuje się jednorazowy pomiar diagnostyczny za pomocą urządzeń dedykowanych do pomiarów korozyjnych na konstrukcjach. Niestety są to badania realizowane w konkretnych warunkach termiczno--wilgotnościowych betonu, często przy nie znanych stężeniach substancji wywołujących korozję zbrojenia. Zasadniczo szybkość korozji zbrojenia w konstrukcjach betonowych jest bardzo zmienna [1, 8] i jednorazowy pomiar może bardzo znacząco przeszacować lub nie doszacować aktualny stan zagrożenia korozyjnego zbrojenia. Lepszym rozwiązaniem jest prowadzenie badań na wyciętych z konstrukcji rdzeniach betonowych zawierających fragmenty zbrojenia, które umieszcza się w komorze klimatycznej - rys. 1a [10]. Próbki wkłada się do komory w celu zadania ekstremalnych warunków termiczno-wilgotnościowych mogących zaistnieć w otoczeniu badanej konstrukcji, które będą sprzyjać rozwojowi lub spowolnieniu procesów korozyjnych na stali zbrojeniowej . Wyznaczenie w opisanych warunkach maksymalnej i minimalnej granicy przedziału szybkości korozji zbrojenia realizuje się metodami elektrochemicznymi z wykorzystaniem potencjostatu 1, najczęściej metodą oporu polaryzacji LPR lub elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej EIS – rys. 1b. Stosowany w tych badaniach układ trójelektrodowy ze zbrojeniem 2 jako elektrodą badaną, ze względu na konieczność przyłożenia elektrody pomocniczej 3 i elektrody odniesienia 4 poprzez grubą otulinę 5 betonową zbrojenia i wilgotną podkładkę filcową 6 (która lokalnie zmienia wilgotność betonu), jest źródłem zaburzeń wyników utrudniając lub nierzadko uniemożliwiając ich analizę.

Niestety, możliwe jest także uszkodzenie rdzeni w trakcie ich mechanicznego wycinania z konstrukcji. Na rys. 2a przedstawiono rdzeń betonowy z pęknięciami powierzchniowymi, natomiast na rys. 2b i 2c widoczne są między innymi pęknięcia poprzeczne, które odsłaniają zbrojenie, pozbawiając pręty na znacznej ich powierzchni ochronnego działania betonu. Na rys. 2d przedstawiono rdzeń betonowy, który nie nadaje się do wykorzystania w badaniach szybkości korozji zbrojenia w betonie. Niestety bardzo często ponowne pobranie nowych rdzeni z konstrukcji jest niemożliwe, więc konieczne jest wykonanie badania na uszkodzonym materiale



Rys. 2. Uszkodzone rdzenie wycięte z konstrukcji żelbetowych przeznaczone do badań szybkości korozji zbrojenia w betonie – opis w tekście

Fig. 2. Damaged cores drilled from reinforced concrete structures to perform tests on corrosion rate of concrete reinforcement - description in the text

crete resistance and pH, concentration of chloride ions, and even oxygen content [2-5, 9]. The evaluation of the development of corrosion processes of reinforcement in existing concrete structures is more problematic because the application of sensors for monitoring corrosion is much more difficult. The most common solution is a single diagnostic measurement using equipment developed for measuring corrosion in structures. Unfortunately, these tests have to be performed under certain thermal and humidity conditions in concrete, often at unknown concentrations of substances that cause reinforcement corrosion. Generally, the corrosion rate of reinforcement in concrete structures is very changeable [1, 8] and a single measurement can considerably over- or underestimate the current state of corrosion risk of reinforcement. A better solution seems to be the performance of tests on concrete cores with fragments of reinforcement, drilled from a structure, and placed in a climatic chamber - Fig. 1a [10]. Specimens are then put into the chamber to create extreme thermal and humidity conditions that are likely to occur in the environment of the tested structure, to foster the development or inhibition of corrosion processes of reinforcing steel. Maximum and minimum limits of corrosion rate of reinforcement were determined under the above conditions using electrochemical methods with the potentiostat 1, usually the method of Linear Polarization Resistance (LPR) or Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) – Fig. 1b. The three-electrode setup was used in tests. It was composed of the reinforcement 2 as the working electrode because the auxiliary electrode 3 and the reference electrode 4 had to be applied through the thick concrete cover 5 of the reinforcement and the wet felt washer 6 (which locally changed moisture content of concrete). And reinforcement was the source of discrepancies in results disturbance and consequently, caused their analysis more difficult, and sometimes even impossible.

However, mechanical drilling of cores from the structure can lead to their unintended damage. Fig. 2a illustrates the concrete core with surface cracks, and Figs 2b and 2c show transverse cracks revealing the reinforcement, and depriving a considerable area of rebars of concrete protection. Fig. 2d presents the concrete core unsuitable for testing the corrosion rate of concrete reinforcement. Unfortunately, drilling new cores from the structure is often impossible, and then tests have to be performed on the damaged



Rys. 3. Elementy próbne przycięte z rdzeni betonowych – opis w tekście Fig. 3. Test from concrete cores – description in the text

Rys. 4. Układy elektrod zastosowane w badaniach szybkości korozji metodami elektrochemicznymi – opis w tekście

Fig. 4. The arrangement of electrodes during tests on corrosion rate performed with electrochemical methods – description in the text

badawczym (rdzenie na rys 2a÷c), ale w sposób zapewniający uzyskanie prawidłowych wyników.

Celem artykułu jest porównanie wyników pomiarów korozyjnych uzyskanych w polaryzacyjnych badaniach stałoprądowych przy zastosowaniu tradycyjnie przykładanej do rdzeni elektrody odniesienia i pomocniczej, z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu elektrod na stałe scalonych z betonem rdzenia. Podjęto próbę wykonania badań elektrochemicznych także na uszkodzonych rdzeniach betonowych z nieregularnymi i nierównymi podstawami walca. Przedstawiono także rozkład potencjału w rdzeniu betonowym uzyskany metodą elementów skończonych (MES), przy uwzględnieniu tradycyjnego i nowego rozwiązania elektrody pomocniczej.

2. Przebieg badań

Badania elektrochemiczne zbrojenia w próbkach betonowych przyciętych z rdzeni przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie pomiary realizowano na dwóch nieuszkodzonych próbkach walcowych średnicy 60 mm i wysokości 50 mm (oznaczonych jako No. 1 i No. 2) – rys. 3a. Rdzenie wycięto z żelbetowych płyt wykonanych z betonu C20/25 na cemencie CEM I, wraz z fragmentem przeciętego gładkiego pręta zbrojeniowego 1 średnicy 6 mm ze stali St3SX (gatunek obecnie nie używany). W drugim etapie mechanicznie usunięto otulenie betonowe wcześniej badanych rdzeni (rys. 3b i 3c), celem zademonstrowania wpływu uszkodzenia betonu na wyniki pomiarów polaryzacyjnych. research material (cores in Figs $2a\!\div\!c)$ ensuring that reliable results are obtained.

The aim of this article is to compare results from measuring corrosion during d.c. polarization measurements using the traditional reference electrode applied to cores and the auxiliary electrode with results for electrodes permanently embedded into concrete core. An attempt was made to perform electrochemical tests also on damaged concrete cores with irregular and uneven bases of a cylinder. This paper also discusses the potential distribution over the concrete core determined with FEM while taking into account the traditional and modern solutions for the auxiliary electrode.

2. Course of tests

Electrochemical tests on reinforcement in concrete specimens drilled from cores were conducted in two stages. In the first stage, measurements were taken on two undamaged cylindrical specimens with a diameter of 60 mm and 50 mm in height (marked as No. 1 and No. 2) – Fig. 3a. Cores were drilled from reinforced concrete slabs made of concrete C20/25 with cement CEM I, with a fragment of a cut smooth rebar *1* having a diameter of 6 mm, made of (already not used) steel St3SX. In the second stage, the concrete cover of previously tested cores was mechanically removed (Figs 3b and 3c) to show how concrete damage affected results of polarization measurements.



Rys. 5. Wykresy krzywych polaryzacji w badaniach potencjodynamicznych przy różnych układach elektrod dla próbek nieuszkodzonych – opis w tekście Fig. 5. Polarization curves from potentiodynamic tests on different electrode arrangements for undamaged specimens – description in the text

Przed realizacją obu etapów badań pobocznicę każdej próbki pokryto powłoką 2 wykonaną na bazie komercyjnego lakieru z dodatkiem proszku srebra w proporcjach wagowych 1:1 - kształt powłoki pokazano na rys. 3a. Miejsce połączenia pręta zbrojeniowego 1 oraz powłokowej elektrody pomocniczej 2 z przewodem elektrycznym zabezpieczano żywicą – rys. 3a. Ponadto w próbkach wykonywano otwory w okolicach prętów zbrojeniowych (czoło otworu znajdowało się ok. 5 mm od powierzchni pręta), w których za pomocą zaczynu cementowego osadzano wałki grafitowe 3 z zaizolowaną pobocznicą. Przez cały okres badań (etap pierwszy i drugi) próbki eksponowano w komorze klimatycznej w temperaturze 20°C i wilgotności 50%. Przygotowując rdzenie do drugiego etapu badań, w próbce nr 1 mechanicznie usunięto otulenie betonowe w taki sposób, aby warstwa betonu grubości od 3 do 10 mm pokrywała pręt zbrojeniowy – rys. 3b. Natomiast usunięcie otulenia w próbce nr 2 spowodowało odsłonięcie ok. 40% powierzchni pręta zbrojeniowego - rys. 3c.

Badania elektrochemiczne wykonano stosując dwa główne układy elektrod – rys. 4. Elektrodą badaną w każdym układzie był fragment pręta zbrojeniowego 1. Elektrodą odniesienia była przykładana do powierzchni podstawy próbki standardowa elektroda Ag, AgCl | Cl⁻⁴ w układzie I lub wałek grafitowy 3 w układzie II. Użycie wałka grafitowego w betonie jako elektrody odniesienia było badane w pracy [6], gdzie stwierdzono zadawalającą stabilność potencjału przy różnych czynnikach zewnętrznych. Elektrodą pomocniczą był krążek blachy 5 ze stali trudnordzewiejącej w układzie I lub powłoka 2 wykonana z proszku srebra na bazie komercyjnego lakieru w układzie *II*.

W układzie I zastosowano zarówno podkładkę filcową 6 (rys. 4 komórki lu-1 i ld-1) oraz warstwę komercyjnego żelu przewodzącego 7 do zastosowań medycznych z dodatkiem chlorku sodu. W przypadku uszkodzenia otulenia betonowego przyłożenie podkładki filcowej było niemożliwe – rys. 4 komórka ld-1. W celach porównawczych przy próbkach z uszkodzonym otuleniem zastosowano trzeci układ elektrod (rys. 4 komórka IIId) składający się z grafitowej elektrody odniesienia 3 oraz krążka blachy 5 ze stali trudnordzewiejącej na warstwie żelu 7.

Badania elektrochemiczne we wszystkich układach elektrod poprzedziła stabilizacja potencjału przez 1÷2 godziny. Następnie wykonywano badania stałoprądowe metodą potencjodynamiczną w zakresie od –150 mV do +100 mV z szybkością zmiany potencjału 1 mV/s.

3. Wyniki i analiza badań

Wyniki badań w postaci krzywej polaryzacji wykonanych metodą potencjodynamiczną dla próbki nr 1 przedstawiono na rys. 5a, a dla próbki nr 2 na rys. 5b. W obu próbkach stosując przykładane elektrody pomocnicze i odniesienia (krzywe *lu* i *lu-1*mrys. 5) niezależnie od wariantu nośnika zapewniającego kontakt elektryczny z betonem (wilgotny filc czy żel przewo-

Prior to the above stages, a side surface of each specimen was covered with the coat 2 based on the commercial varnish with silver powder in a 1:1 weight ratio – the coat shape is shown in Fig. 3a. The junction of the rebar 1 and the coated auxiliary electrode 2 with a conductor was protected with resin – Fig. 3a. Moreover, openings were performed in specimens, near rebars (the opening face was within a distance of ca. 5 mm from the rebar surface). They were used to place graphite rods 3 with insulated side surfaces using the cement grout. Specimens were kept in the climatic chamber with a temperature of 20°C and humidity of 50% during the whole period of tests. Preparatory works for the second stage of tests included mechanical removal of concrete cover in the specimen No. 1 to leave the rebar covered with a 3-10 mm thick concrete layer – Fig. 3b. And the cover removal in the specimen No. 2 caused uncovering of ca. 40% of the rebar surface – Fig. 3c.

Electrochemical tests were conducted using two main arrangements of electrodes – Fig. 4. A fragment of the rebar 1 was used as a working electrode in each arrangement. The reference electrode was a standard electrode Ag, AgCl | Cl⁻ 4 in the arrangement I or a graphite rod 3 in the arrangement II, applied to the specimen base. The application of the graphite rod as a reference electrode was discussed in the paper [6], where the satisfactory potential stability was found under different external factors. The auxiliary electrode was a stainless steel disk 5 in the arrangement I or the coat 2 of silver powder in the commercial varnish in the arrangement II.

The felt washer 6 (Fig. 4 photos lu-1 and ld-1) and a layer of popular conductive gel 7 for medical application, with the additive of sodium chloride, were used in the arrangement I. The use of the felt washer was impossible when the concrete cover was damaged – Fig. 4 photo ld-1. For comparative purposes, a third type of the electrode arrangement (Fig. 4 photo IIId) was used in specimens with the damaged cover. It was composed of the graphite reference electrode 3 and the stainless steel disk 5 on the gel layer 7.

Electrochemical tests on all electrode arrangements were performed after stabilising the potential for $1\div 2$ hours. Then, d.c. potentiodynamic measurements were taken within the range of -150mV do +100 mV and at the rate of potential change of 1 mV/s.

3. Test results and their analysis

Test results presented by a polarization curve were conducted using the potentiodynamic method are shown in Fig. 5a for the specimen No. 1, and in Fig. 5b for the specimen No. 2. The image of curves for both specimens, to which the reference and auxiliary electrodes were applied (curves *lu* and *lu*-1 in Fig. 5) was not clear enough to determine values of corrosion current density



Rys. 6. Wykresy krzywych polaryzacji w badaniach potencjodynamicznych przy różnych układach elektrod dla próbek uszkodzonych – opis w tekście Fig. 6. Polarization curves plotted from potentiodynamic tests on different electrode arrangements for damaged specimens – description in the text

dzący) obraz krzywych uniemożliwiał określenie wartości gęstości prądu korozyjnego. Natomiast zastosowanie elektrod na stałe utwierdzonych w próbce umożliwiło otrzymanie krzywych polaryzacji (krzywe *llu* rys. 5a i 5b) nadających się do analizy. Należy zwrócić uwagę, że krzywe *llu* są przesunięte w stronę niższych wartości potencjału z powodu zastosowania elektrody grafitowej charakteryzującej się wyższym potencjałem niż elektroda Ag, AgCl | Cl⁻. Natomiast wszystkie krzywe poszczególnych próbek leżą w bardzo zbliżonym zakresie natężenia prądu, co może świadczyć, że polaryzacja elektrody badanej przebiegała w podobny sposób.

Nieregularny kształt krzywych *lu* i *lu-1* jest związany głównie z omowym spadkiem potencjału powstałym na odcinku stosunkowo suchego betonu otulenia pręta, który potencjostat aktywnie kompensuje. Im beton jest bardziej suchy tym kompensacja jest trudniejsza, a krzywa polaryzacji bardziej nieregularna.

W drugim etapie badań podjęto próbę określenia wpływu uszkodzenia otulenia betonowego na wyniki pomiarów. Na rys. 6a przedstawiono krzywe polaryzacji uzyskane w badaniach metodą potencjodynamiczną przeprowadzonych na próbce nr 1, a na rys. 6b na próbce nr 2. W próbce nr 1 w układzie elektrod Id analogicznie jak w próbce nieuszkodzonej obraz krzywej nie pozwolił na przeprowadzenie analizy wyników. Przy układzie elektrod IId obraz krzywej był niezaburzony i umożliwiał określenie gęstości prądu korozyjnego. Należy zwrócić uwagę, że obie krzywe Id i IId leżą w zbliżonym przedziale gęstości prądów korozyjnych (początek i koniec obu krzywych ma miejsce przy zbliżonych gęstościach prądu), a określona na podstawie krzywej Ild gęstość prądu korozyjnego metodą ekstrapolacji prostoliniowych odcinków anodowych i katodowych jest zbliżona do wartości uzyskanej na podstawie krzywej Ilu dla próbki nieuszkodzonej (rys. 5a). Można więc stwierdzić, że usunięcie otuliny przy pełnym pokryciu pręta zbrojeniowego betonem (rys. 3b) nie miało zasadniczego wpływu na uzyskiwane wyniki badań stałoprądowych w układzie II elektrod.

Inaczej sytuacja wyglądała przy badaniach stałoprądowych na próbce nr 2. Tutaj zastosowanie układu elektrod *Id* pozwoliło uzyskać krzywą polaryzacji bez zaburzeń umożliwiającą jej analizę. Analogiczny kształt krzywej otrzymano przy układzie elektrod *Ild*, lecz krzywa była znacznie przesunięta w stronę mniejszych wartości gęstości prądu. Określona na jej podstawie gęstość prądu korozyjnego była zbliżona do tej uzyskanej dla próbki nieuszkodzonej (rys. 5b). Tak silne przesunięcie krzywej *Id* w stronę większych wartości gęstości prądu korozyjnego było związane z zastosowaniem żelu przewodzącego, który pokrywał zarówno powierzchnię betonu jak i całą odsłoniętą powierzchnię pręta – rys. 6c. Polaryzacja pręta miała miejsce nie tylko w obszarze styku pręta z betonem, ale głównie na obszarze pokrytym żelem, stąd tak duża rozbieżność wyników w układach regardless of the carrier providing the electric contact with concrete (wet felt pad or conductive gel). Whereas the application of electrodes permanently embedded into the specimen resulted in polarization curves (the curve *llu* in Figs 5a and 5b) suitable for analyses. It should be noted that curves llu were shifted towards lower values of potential because of the application of the graphite electrode with higher potential that the electrode Ag, AgCl | Cl⁻. All curves for individual specimens were found in the similar range of the current intensity. It could indicate that the working electrode was polarized in a similar way.

The irregular shape of curves *lu* and *lu-1* was mainly related to the drop in electrical resistance observed over the section of relatively dry concrete cover which was actively neutralized by the potentiostat. An increasing dryness of concrete hindered the neutralization, and consequently the polarization curve was more irregular.

The second stage of tests was an attempt to determine how concrete cover damage affected measurement results. Polarization curves obtained from potentiodynamic tests performed on the specimen No. 1 are presented in Fig. 6a, and on the specimen No. 2 in Fig. 6b. Like for the undamaged specimen, the curve image was not clear enough to analyse results for the specimen No. 1 in the electrode arrangement *Id*. The curve for the electrode arrangement IId was undisturbed and could be used to determine the corrosion current density. It should be noted that both curves Id and IId were in the similar range of the corrosion current density (the beginning and the end of both curves was at similar values of the current density). And the corrosion current density determined form the curve IId by extrapolating straight anode and cathode sections was similar to the value determined on the basis of the curve Ilu for the undamaged specimen (Fig. 5a). Thus, the removal of the cover from the rebar entirely covered with concrete (Fig. 3b) fundamentally did not have an impact on results from d.c tests on the electrode arrangement II.

The situation was different during d.c. tests on the specimen No. 2. The electrode arrangement Id resulted in plotting the polarization curve without any disorders and suitable for analysis. A similar shape of the curve was obtained for the electrode arrangement *Ild*; however, the curve was more shifted towards lower values of current density. And the corrosion current density determined on the basis of that curve was close to the value obtained for the undamaged specimen (Fig. 5b). Such a considerable shift of the curve *Id* towards greater values of the corrosion current density was connected with the application of the conductive gel covering both the concrete surface and the whole uncovered area of the rebar – Fig. 6c. The rebar was polarized not only at the interface between the rebar and concrete, but mainly

elektrod *ld i lld.* Można więc stwierdzić, że uszkodzenie próbki skutkujące odspojeniem betonu od stalowego pręta może powodować "grube" błędy w pomiarach gęstości prądu korozyjnego, gdy czynnik przewodzący zapewniający przewodność elektryczną między przykładanymi elektrodami i betonem będzie miał kontakt z prętem zbrojeniowym.

Ostatni etap badań miał na celu sprawdzenie dodatkowego układu elektrod, w którym zastosowano przykładaną elektrodę pomocniczą 5 wraz z zamocowaną na stałe w betonie grafitową elektrodą odniesienia 3 – rys. 4, komórka IIId. Krzywe polaryzacji *IIId* przedstawione na rys. 6a i 6b nie wykazują zaburzeń i mają postać umożliwiającą określenie gęstości prądu korozyjnego. W przypadku próbki nieuszkodzonej analizowana krzywa *IIId* była bardzo zbieżna z krzywą *IId*, co może świadczyć, że polaryzacja pręta w obu układach elektrod była bardzo podobna. Natomiast w próbce uszkodzonej krzywa *IIId* nie miała zaburzeń, ale podobnie jak krzywa *Id* była usytuowana w obszarze dużych gęstości prądu w związku z pokryciem pręta zbrojeniowego żelem.

Badania na próbkach uszkodzonych i nieuszkodzonych pozwalają stwierdzić, że tylko zastosowanie przykładanej do powierzchni betonu elektrody odniesienia powoduje zaburzenia przy rejestracji krzywych w badaniach stałoprądowych. Natomiast wprowadzenie do betonu elektrody osadzonej blisko powierzchni pręta umożliwia niezależnie od rodzaju zastosowanych przeciwelektrod rejestrację krzywej polaryzacji bez istotnych zaburzeń.

4. Analiza MES rozkładu potencjału w badaniach stałoprądowych

Powyższe badania doświadczalne wskazują, że przykładane elektrody, zwłaszcza elektrody odniesienia wywołują duże zaburzenia w rejestracji krzywych polaryzacji. Jednak trudno jest jednoznacznie stwierdzić, czy zaburzenia te nie są potęgowane przez nierównomierną polaryzację zastosowanych przeciwelektrod. Podjęto więc próbę określenia rozkładu potencjału w betonie podczas polaryzowania prądem stałym przy użyciu zastosowanych w badaniach dwóch rodzajów przeciwelektrod metodą elementów skończonych (MES) przy zastsowaniu oprogramowania ANSYS Maxwell. ANSYS Maxwell jest oprogramowaniem do symulowania zagadnień związanych z polami elektromagnetycznymi niskiej częstotliwości według równań Maxwella. Program posiada zaimplementowane algorytmy obliczeniowe wymagające zdefiniowania geometrii układu, przypisania własności materiałowych oraz określenia interesujących użytkownika wyników analizy. Wykonano dwa modele obliczeniowe, w których geometria układu miała postać przedmiotowych próbek z tym, że w pierwszym przypadku z powłokową elektrodą pomocniczą 1 (rys. 7a), a w drugim z elektrodą w postaci krążka 2 (rys. 7c). W celu wprowadzenia odpowiednich właściwości materiałowych do modelu wykorzystano wyniki badań zamieszczone w pracy [7], które dotyczyły rozkładu potencjału podczas badań polaryzacyjnych na długości pręta zanurzonego w roztworach symulujących właściwości elektryczne betonu. W przypadku betonu przyjęto przewodność $\sigma_b =$ 0,8 S/m oraz względną przenikalność elektryczną $\epsilon_b =$ 80,1. Natomiast w przypadku stali zbrojeniowej otoczonej środowiskiem silnie alkalicznym konieczne było wprowadzenie warstwy grubości 1 mm symulującej warstwę tlenku, której względną przenikalność elektryczną ɛ_s arbitralnie przyjęto równą 1, a przewodność elektryczną σ_s przyjęto na poziomie 1,0 S/m. Ponadto założono, że przeciwelektrody mają przewodność przewodników metalicznych równą $\sigma_s = 10^8$ S/m, ze względną przenikalnością elektryczną $\epsilon_s =$ 1,0. Na rys. 7b i 7d przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych rozkładu potencjału w próbkach wraz z przekrojami, przy zadanej różnicy potencjałów między przeciwelektrodą a prętem zbrojeniowym równej 50 mV. Można zauważyć, że rozkłady potencjału w obu modelach w pobliżu pręta są zbliżone do siebie i rozkładają sią równomiernie wokół pręta, co może świadczyć o zbliżonym spoon the area covered with the gel. It was an explanation for such big discrepancies in results for electrode arrangements *Id* and *Ild*. Accordingly, the specimen damage resulting in concrete splitting from the steel bar could cause "serious" errors in measurements of the corrosion current density if the medium providing conductance between applied electrodes and concrete was in contact with the rebar.

The final stage of tests was to verify the additional arrangement of electrodes, in which the auxiliary electrode 5 was applied with the graphite reference electrode 3 permanently embedded into concrete – Fig. 4, photo IIId. Polarization curves *IIId* shown in Figs 6a and 6b did not have any disorders and could be used to determine density of corrosion current. For the undamaged specimen, the analysed curve *IIId* was very similar to the curve *IId*, which could indicate that the rebar polarization in both types of the electrode arrangement was similar. And regarding the damaged specimen, the curve *IIId* had no disorders; but like in case of the curve *Id*, the curve was near high values of current density as the rebar was covered with the gel.

Tests conducted on damaged and undamaged specimens indicated that only the application of the reference electrode to concrete surface caused disorders while recording curves in d.c. tests. And of inserting the electrode to concrete, close to the rebar surface, provided recording of polarization curves without any significant disorders regardless of used counter electrodes.

4. FEM analysis of potential distribution during d.c. tests

The above tests indicated that applied electrodes, particular reference electrodes, caused significant disorders while recording polarization curves. However, it could not be clearly stated whether those disorders were intensified by uneven polarization of used counter electrodes. Thus, an attempt was made to determine the potential distribution over concrete during polarization with direct current using two types of counter electrodes employed in tests. FEM method and ANSYS Maxwel software were applied. ANSYS Maxwell is a software that provides simulation of events connected with low-frequency electromagnetic fields according to Maxwell equations. The software has implemented calculation algorithms requiring defined geometry of an arrangement, attributed material properties and customer-specified results from analyses. Two calculation models were prepared, in which the arrangement geometry was in the form of tested specimen with the coated auxiliary electrode 1 (Fig. 7a) or the disk electrode 2 (Fig. 7c). To set adequate material properties into the models, we used test results presented in the paper [7]. They referred to the potential distribution during polarization tests along the length of the rebar immersed in solutions modelling electric properties of concrete. Regarding concrete, the assumed conductance was σ_b = 0.8 S/m and dielectric constant was ϵ_b = 80.1. Reinforcing steel in a strongly alkaline environment required a 1 mm-thick layer modelling oxygen layer with dielectric constant $\epsilon_{s}\;$ was arbitrary assumed as 1, and conductance σ_s was assumed as 1.0 S/m. Moreover, the adopted conductance of metallic conductors was $\sigma_s = 10^8$ S/m, and dielectric constant $\varepsilon_s = 1.0$. Figs 7b and 7d demonstrate numerical calculations for the potential distribution in specimens with their cross-sections at the preset potential difference between the counter electrode and the rebar, equal to 50 mV. It can be noted that the potential distribution in both specimens near the rebar were similar and evenly distributed around that rebar. It may indicate the similar polarization process. On the basis of the above, it could be found that the traditional auxiliary electrode - the metal disk, applied to concrete in core testing polarized the rebar in the cylindrical



Rys. 7. Analiza MES rozkładu potencjału w badaniach stałoprądowych stalowego pręta zbrojeniowego w betonowej próbce przyciętej z walcowego rdzenia – opis w tekście

Fig. 7. FEM analysis of potential distribution during d.c. tests on steel rebar in the concrete specimen from the cylindrical core – description in the text

sobie polaryzacji. Na tej podstawie można stwierdzić, że tradycyjna w badaniach rdzeni elektroda pomocnicza w postaci krążka blachy, przykładana do betonu, w podobny sposób polaryzuje pręt zbrojeniowy w wyciętym z konstrukcji walcowym rdzeniu, jak elektroda powłokowa na stałe scalona z betonem.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone dwa etapy badań stałoprądowych na zbrojeniu znajdującym się w wyciętych z konstrukcji betonowych rdzeniach pozwalają stwierdzić, że tylko elektrody odniesienia na stałe osadzone blisko powierzchni pręta umożliwiają, niezależnie od rodzaju zastosowanych przeciwelektrod, rejestrację krzywych polaryzacji bez istotnych zaburzeń. Zastosowanie przykładanej do powierzchni betonu elektrody odniesienia powoduje istotne zaburzenia przy rejestracji krzywych polaryzacji, szczególnie przy niewielkiej wilgotności betonu.

Na podstawie analizy obliczeniowej za pomocą MES można zauważyć, że tradycyjna (w badaniach rdzeni betonowych) elektroda pomocnicza w postaci krążka blachy polaryzuje pręt zbrojeniowy w sposób zbliżony do powłokowej elektrody na pobocznicy walca, która nie powinna być przyczyną zaburzeń przy rejestrowaniu krzywych polaryzacji.

Można więc stwierdzić, że łatwy do aplikacji zaproponowany układ elektrod na stałe powiązany z badanym rdzeniem, nawet przy mało wilgotnym betonie i znacznie uszkodzonej próbce, pozwala uzyskać miarodajne wartości szybkości korozji zbrojenia. core from the structure in a similar way to the coated electrode permanently embedded into concrete.

5. Conclusions

Both stages of d.c. tests on the reinforcement in concrete cores drilled from structures indicate that only reference electrodes permanently embedded near the rebar surface could record polarization curves without any significant disorders regardless of the type of used counter electrode. The application of the reference electrode to concrete surface caused serious disorders, especially in slightly wet concrete.

The calculation analysis made with the FEM method demonstrated that the traditional auxiliary electrode - the metal disk (applied to concrete in core testing) polarized the rebar in a similar way to the coated electrode on the cylinder side surface, which should not be the reason for disorders in recording polarization curves.

Thus, the recommended arrangement of electrodes permanently embedde into the tested core which is easy to apply results in reliable values of the corrosion rate of the reinforcement even in slightly wet concrete.

BIBLIOGRAFIA

- Andrade, C., Alonso, C., & Saría, J. 2002. "Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere". *Cement and Concrete Composites*, 24 (1), 55–64. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00026-9
- [2] Andrade, C., & Martinez, I. 2006. Corrosion Rate Monitoring of Deteriorated and Repaired Structures Through on-Site Linear Polarization Measurements Using Surface or Embedded Sensors. 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, September 2006, Quebec City, Canada.
- [3] Behnood, A., Van Tittelboom, K., & De Belie, N. 2016. "Methods for measuring pH in concrete: A review". Construction and Building Materials, 105, 176–188. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.032
- [4] Correia, M. J., Pereira, E. V., Salta, M. M., & Fonseca, I. T. E. 2006. "Sensor for oxygen evaluation in concrete". *Cement and Concrete Composites*, 28(3), 226–232. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.006
- [5] Dong, S. G., Lin, C. J., Hu, R. G., Li, L. Q., & Du, R. G. 2011. "Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor". *Electrochimica Acta*, 56(4), 1881–1888. https://doi.org/10.1016/j. electacta.2010.08.089

- [6] Duffó, G. S., Farina, S. B., & Giordano, C. M. 2010. "Embeddable reference electrodes for corrosion monitoring of reinforced concrete structures". *Materials and Corrosion*, 61(6), 480–489. https://doi.org/10.1002/ maco.200905346
- [7] Jaśniok, M., & Jaśniok, T. 2017. "Measurements on Corrosion Rate of Reinforcing Steel under various Environmental Conditions, Using an Insulator to Delimit the Polarized Area". *Procedia Engineering*, 193, 431–438. https://doi. org/10.1016/j.proeng.2017.06.234
- [8] Jaśniok, T., & Jaśniok, M. 2015. "Influence of rapid changes of moisture content in concrete and temperature on corrosion rate of reinforcing steel". *Procedia Engineering*, 108, 316–323. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.153
- [9] Yu, H., & Caseres, L. 2012. "An embedded multi-parameter corrosion sensor for reinforced concrete structures". *Materials and Corrosion*, 63 (11), 1011– 1016. https://doi.org/10.1002/maco.201106113
- [10] Zybura, A., Jaśniok, M., & Jaśniok, T. 2012. Patent No. PL 224072 B1. Poland: Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej.