Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska / Department of Building Structures, Silesian University of Technology

DOI: 10.15199/40.2016.7.1

Badanie wpływu szerokości przeciwelektrody na zasięg polaryzacji w pomiarach impedancyjnych mierzony po obwodzie preta zbrojeniowego

Praca dotyczy badań polaryzacyjnych stalowego zbrojenia w roztworze modelującym ciecz porową betonu. Podjęto próbę oceny wpływu zasięgu polaryzacji mierzonego w sposób nietypowy, bo po obwodzie pręta, zamiast w kierunku jego długości. Badania zrealizowano w układzie trójelektrodowym metodą spektroskopii impedancyjnej. Elektrodą badaną był stalowy pręt o średnicy 22 mm ze stali zbrojeniowej RB500. Jako elektrodę referencyjną zastosowano $C\Gamma/AgCl,Ag$, natomiast przeciwelektrodę wykonano z blachy ze stali odpornej na korozję. W badaniach uwzględniono jako zmienne trzy parametry geometryczne układu: obwodowy zasięg polaryzacji, szerokość przeciwelektrody oraz odległość przeciwelektrody od badanego pręta. Efekt skokowej zmiany obwodowego zasięgu polaryzacji uzyskano dzięki stopniowemu obniżaniu poziomu roztworu wodnego wypełniającego pojemnik z elektrodami. Roztworem w pojemniku była syntetyczna ciecz porowa o pH = 13,4, w której oczekiwano pasywacji stalowego pręta. Analiza wyników badań wykazała, że szerokość przeciwelektrody może mieć wpływ na brak powtarzalności zależności liniowej między oporem przeniesienia ładunku a zasięgiem polaryzacji obwodowej pręta zbrojeniowego.

<u>Słowa kluczowe:</u> konstrukcje betonowe, stal zbrojeniowa, ciecz porowa betonu, zasięg polaryzacji, opór przeniesienia ładunku, spektroskopia impedancyjna, EIS, modelowanie

The effect of counter electrode width on the polarization range around the rebar circumference during impedance measurements

This paper concerns the polarization tests on steel reinforcement in a solution simulating concrete pore solution. It describes an attempt to evaluate the effect of polarization range measured in an unusual way, that is, around the rebar circumference, and not along its length. Tests were conducted in a three-electrode system by impedance spectroscopy. A working electrode was a steel bar with a diameter of 22 mm, made of reinforcing steel of grade RB500. $C\Gamma/AgCl,Ag$ electrode was used as a reference electrode, and a counter electrode was made of corrosion-resistant steel sheet. Three geometric parameters of the system: polarization of circumferential range, the counter electrode width and the counter electrode distance from the tested rebar were considered as variables during the tests. A discrete change in the circumferential range of polarization was achieved by decreasing gradually the level of an aqueous solution in a container with electrodes. The container was filled with synthetic pore solution with pH = 13.4, in which passivation of the steel bar was expected. The analysed test results indicated that the counter electrode width could have an impact on the fact that the linear relationship between charge transfer resistance and the polarization range around the rebar circumference was not repeatable.

<u>Keywords:</u> concrete structures, reinforcing steel, concrete pore solution, polarization range, charge transfer resistance, impedance spectroscopy, EIS, simulation

1. Wprowadzenie

Umiejętność prawidłowej oceny zagrożenia korozyjnego odpowiedzialnych konstrukcji betonowych jest dużym wyzwaniem dla inżynierów budownictwa [14]. Ponieważ procesy degradacji korozyjnej stali

Informacje o Autorach:

Dr hab. inż. Mariusz Jaśniok – adiunkt w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej, absolwent Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w metodach elektrochemicznej regeneracji betonu oraz w diagnostyce korozyjnej konstrukcji żelbetowych metodami elektrochemicznymi.

e-mail: mariusz.jasniok@polsl.pl

Mgr inž. Michael Pamuła – doktorant w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej. Zajmuje się problemami diagnostyki korozyjnej żelbetu.

e-mail: michael.pamula@polsl.pl

Otrzymano / Received: 8.03.2016 • Przyjęto / Accepted: 19.04.2016

1. Introduction

Civil engineers face a great challenge to estimate properly the corrosion risk for significant concrete structures [14]. Corrosion degradation of steel in concrete is an electrochemical process, thus methods typical

About the Authors:

Dr hab. inż. Mariusz Jaśniok [PhD. DSc. Eng.] – assistant professor in the Department of Building Structures at the Silesian University of Technology. He specializes in issues related to electrochemical methods of concrete restoration and corrosion diagnostics of reinforced concrete structures by electrochemical methods.

e-mail: mariusz.jasniok@polsl.pl

Mgr inż. Michael Pamuła [MSc Eng.] – a PhD student in the Department of Building Structures at Silesian University of Technology. They specialize in problems with diagnosis of reinforced concrete corrosion. e-mail: michael.pamula@polsl.pl

w betonie mają charakter elektrochemiczny, to w sposób naturalny do ich analizy wykorzystuje się metody stosowane w laboratoriach chemicznych. Bezpośrednie przeniesienie znanych z laboratoriów technik badawczych na konstrukcje żelbetowe jest jednak niemożliwe. W szczególności problem adaptacji badań elektrochemicznych do elementów betonowych dotyczy pomiarów polaryzacyjnych szybkości korozji zbrojenia. W przeciwieństwie do klasycznych laboratoryjnych badań polaryzacyjnych na małych odpowiednio przygotowanych próbkach metalu, pomiary polaryzacyjne na konstrukcji dotyczą bardzo długich, nieoczyszczonych i osłoniętych betonem prętów zbrojeniowych. Oprócz wymienionych komplikacji dochodzi jeszcze jeden, najważniejszy, związany z powierzchnią czynną elektrody badanej, czyli stalowego zbrojenia. Ponieważ pomiary polaryzacyjne prowadzi się w układzie trójelektrodowym, w którym elektroda referencyjna wraz z przeciwelektrodą umieszczane są na powierzchni betonowego elementu, to prady polaryzacyjne poprzez betonowa otuline docieraja do powierzchni stali zbrojeniowej w sposób niekontrolowany. Innymi słowy zasięg polaryzacji zbrojenia w betonie jest trudny do jednoznacznego zidentyfikowania i tym samym powierzchnia czynna elektrody badanej może być mało precyzyjnie wyznaczona. Jednak istnieją obecnie rozwiązania techniczne, które ten problem częściowo rozwiązują [1, 8, 13], ale nadal jest to zagadnienie wymagające dopracowania i dalszych badań.

Dlatego też w niniejszym artykule podjęto próbę analizy zasięgu polaryzacji mierzonej po obwodzie walcowej pobocznicy pręta zbrojeniowego. Warto podkreślić, że dotychczas prowadzone badania opisanego problemu dotyczyły zazwyczaj zasięgu polaryzacji w kierunku długości prętów zbrojeniowych [1, 3, 5, 9–11]. Głównym celem badań opisanych w niniejszym artykule jest empiryczna ocena wpływu polaryzacji owalnej elektrody badanej przez płaską przeciwelektrodę na liniową zależność między oporem przeniesienia ładunku a powierzchnią polaryzacji obwodowej pręta.

Badania stanowią również kolejny krok w udoskonaleniu już istniejącego modelu układu 'przeciwelektroda-beton-pręt zbrojeniowy' opisanego w pracach [4, 6, 7], który jest w stadium ewaluacji. Jednym z zasadniczych założeń tego modelu jest wyznaczenie tzw. ścieżek przewodzenia prądu elektrycznego między płaską przeciwelektrodą i owalną elektrodą badaną. Na końcu każdej krzywoliniowej betonowej ścieżki przewodzącej prąd między elektrodami znajduje się fragment zakrzywionej powierzchni pobocznicy walcowego pręta zbrojeniowego. Oznacza to, że w modelu symuluje się fragmentaryczną polaryzację badanego pręta zbrojeniowego. Opisane w niniejszym artykule badania są więc również próbą empirycznego odwzorowania tego zjawiska.

2. Stanowisko pomiarowe i przebieg badań

W celu uniknięcia zakłóceń pomiarowych związanych z niejednorodnością struktury i nierównomiernym zawilgoceniem betonu, badania przeprowadzono w roztworze syntetycznej cieczy porowej betonu. Roztwór przygotowano z trzech wodorotlenków 0,06 *M* KOH + 0,2 *M* NaOH + 0,001 *M* Ca(OH)₂ o pH = 13,4 [12]. Temperatura roztworu w trakcie pomiarów wynosiła 19⁰C. Badania zrealizowano na stanowisku pomiarowym pokazanym na rys 1 z trzema elektrodami: badaną *1*, referencyjną *2* i pomocniczą *3*. Układ trójelektrodowy podłączono do potencjostatu *4*.

Elektrodę badaną *1* wykonano z żebrowanej stali zbrojeniowej gatunku RB500 o średnicy 25 mm, którą w wyniku obróbki tokarskiej sprowadzono do stalowego walca średnicy 22 mm i długości 140 mm. Celem obróbki tokarskiej było usunięcie żebrowania, aby wyeliminować problemy z precyzyjną identyfikacją powierzchni czynnej elektrody badanej. Oba końce pręta zostały zaizolowane elektrycznie 5 na odcinkach 20 mm, tak aby wysokość pobocznicy stalowego walca wynosiła 100 mm. Pręt *1* został usytuowany równolegle do jednej z osi symetrii zbiornika w odległości 45 mm od jego dna. Jako elektrodę referencyjną *2* zastosowano Cl⁻/AgCl,Ag przystosowaną do pomiarów w kierunku pionowym od dołu. Elektrodę *2* wprowadzono przez otwór zabezpieczony uszczelkami *6* w płytce dennej pojemnika *7*. Natomiast jako przeciwelektrody *3* zastosowano trzy prostokątne blachy grubości 2 mm ze stali odpornej na korozję. Blachy miały stałą długość 100 mm i trzy różne szerokości. W celu kontrolowania wypływu prądów

for chemical laboratories are used for analysing such processes. Direct transfer of testing techniques from the laboratories into reinforced concrete structures is yet impossible. The issue on adjusting electrochemical tests to concrete elements concerns polarization measurements of corrosion rate of reinforcement. Contrary to classic laboratory tests on polarization of small and properly prepared metal specimens, polarization measurements of structures refer to very long, not cleaned rebars covered with concrete. Apart from the mentioned problems, another one - the most important problem related to the active surface of the working electrode, that is, the steel reinforcement, is encountered. Since polarization measurements are performed in a three-electrode system where the reference electrode and the counter electrode are placed on the concrete element surface, polarization currents reach the reinforcing steel surface through the concrete cover in an uncontrolled way. In other words, it is difficult to identify unequivocally the range of polarized reinforcement in concrete, and thus to determine precisely the active surface of a working electrode. Other technical solutions are currently available which partly deal with the problem [1, 8, 13]. But this issue still needs further development and tests.

Thus, this paper describes an attempt to analyse the polarization range measured around the circumference of cylindrical side surface of the rebar. It is worth mentioning that previous tests on the described problem usually referred to the polarization range along the rebar length [1, 3, 5, 9-11]. The main purpose of the tests discussed in this paper was the empirical evaluation of the impact of an oval electrode polarized with a flat counter electrode on linear relationship between charge transfer resistance and a polarization area around the rebar circumference.

Those tests were also a further step towards improving the existing model of the "counter electrode–concrete–rebar" system described in the papers [4, 6, 7], being currently in an evaluation phase. Determining the so called conductive paths between the flat counter electrode and the oval working electrode was one of the fundamental assumptions of that model. The end of each curvilinear conductive path in concrete between the electrodes covered a part of the curved cylindrical side surface of the rebar. It means the fragmentary polarization of the tested rebar was simulated in that model. Thus, the tests discussed in this paper are also an empirical attempt to model that phenomenon.

2. A test stand and a course of tests

The tests were conducted in synthetic concrete pore solution to avoid any measurement disturbances related to non-homogeneous structure of concrete and non-uniform moisture content in it. The solution was made of three types of hydroxides $0.06 M \text{ KOH} + 0.2 M \text{ NaOH} + 0.001 M \text{ Ca}(\text{OH})_2$ with pH = 13.4 [12]. During measurements, the solution temperature was 19^oC. The tests were made at a test stand illustrated in Fig. 1 with three electrodes: the working electrode *1*, the reference electrode *2*, and the counter electrode *3*. The three-electrode system was connected to the potentiostat *4*.

The working electrode 1 was made of ribbed reinforcing steel of grade RB500, with a diameter of 25 mm, which was turned to a steel roller with a diameter of 22 mm and the length of 140 mm. Turning was performed to remove ribbing and eliminate any possible problems with identifying the active surface of the working electrode. Electrical insulators 5 were used on both ends of the rebar at the length of 20 mm, to ensure the side surface height of the roller was 100 mm. The rebar 1 was arranged in parallel to one of the container symmetry axis at a distance of 45 mm from its bottom. CL/AgCl,Ag electrode served as the reference electrode 2, which was adapted to perform measurements in upright position. The electrode 2 was placed through a hole, protected with seals 6, in a base plate of the container 7. Three rectangular metal sheets with a thickness of 2 mm, made of corrosion resistant steel were used as the counter electrode 3. The metal sheets were 100 mm long

polaryzacyjnych, wszystkie powierzchnie blachy, za wyjątkiem jednej, zostały zabezpieczone izolacją elektryczną 8.

W badaniach impedancyjnych obwodowego zasięgu polaryzacji oznaczonej jako l_p efekt częściowej polaryzacji pobocznicy elektrody badanej *l* uzyskano dzięki stopniowemu wypuszczaniu cieczy porowej za pomocą zaworu 9. Dzięki temu możliwa była pełna kontrola powierzchni polaryzacji określonej jako $A_p = l_p \times 100$ mm, wymuszanej przez poziom *y* cieczy w zbiorniku (rys. 1). Poza obwodowym zasięgiem polaryzacji l_p w badaniach analizowano dodatkowo dwa zmienne geometrycznie parametry układu: szerokość przeciwelektrody b = 20, 40 i 60 mm oraz odległość w świetle między przeciwelektrodą a elektroda badana c = 15, 25 i 35 mm.

Bezpośrednio przed rozpoczęciem pomiarów elektrochemicznych elektroda badana była mechanicznie polerowana i odtłuszczona acetonem. Po zamocowaniu trzech elektrod w pojemniku 7 wlewano do niego roztwór syntetycznej cieczy porowej. Następnie po ok. 1-2 godzinach stabilizacji potencjału przy poziomie zmienności 2 mV/h rozpoczynano pomiary polaryzacyjne. Badania realizowano metodą spektroskopii impedancyjnej za pomocą potencjostatu Gamry Reference 600. Pomiary prowadzono w trybie potencjostatycznym w zakresie częstotliwości 0,1 Hz÷10 kHz stosując sinusoidalny sygnał zaburzający o amplitudzie 10 mV względem potencjału korozyjnego. Po zakończeniu każdego pomiaru obniżano poziom cieczy w zbiorniku, aby wymusić zmianę obwodowej polaryzacji pręta. Po zrealizowaniu każdej serii pomiarowej, czyli osiągnięciu najniższego poziomu cieczy w zbiorniku y = -2,0cm, elektrodę badaną ponownie odtłuszczano acetonem. Następnie po zmianie jednego z parametrów geometrycznych układu (b lub c) powtarzano opisaną wyżej procedurę pomiarową.

and had three different widths. All metal sheet surfaces, except for one, had electrical insulation δ to monitor outflow of polarization currents.

The effect of partial polarization of the side surface of the tested electrode I was obtained during the impedance measurements of the circumferential polarization marked l_p as pore solution was discharged gradually through a valve 9. As a result, total control was established over the polarization surface defined as o $A_p = l_p \times 100$ mm, forced by the level y of solution in the container (Fig. 1). Beside the circumferential range of polarization l_p , other two geometrically variable parameters were analysed: the counter electrode width b = 20, 40 and 60 mm, and the distance between the counter electrode and the working electrode edges c = 15, 25 and 35 mm.

Prior to electrochemical measurements, the working electrode was mechanically polished and degreased with acetone. When three electrodes were arranged in the container 7, it was filled with synthetic pore solution. Then, after ca. 1-2 hour-long stabilization of potential at the variation level of 2 mV/h, polarization measurements were performed. The tests were carried out by impedance spectroscopy using the potentiostat Gamry Reference 600. Testing was performed at the range of frequencies of 0.1 Hz ÷ 10 kHz in potentiostatic mode with a disturbing sinusoidal signal at the potential amplitude of 10 mV over the corrosion potential. The liquid level in the container was reduced after each measurement to force the change in polarization around the rebar circumference. When each series of measurements was completed, that is, the lowest liquid level in the container was achieved y = -2,0 cm, the working electrode was again degreased with acetone. Then, the whole measurement procedure was repeated as described above when one of the geometric parameters (b or c) of the system was changed.





Rys. 1. Stanowisko badawcze: a) przekrój poprzeczny b) widok w aksonometrii – opis w tekście

Fig. 1. Test stand: a) cross-section b) axonometric projection – described in the text



Fig. 2. Results from impedance measurements illustrated in the Nyquist plots for the rebar in concrete pore solution over: the counter electrode width *b*, distance between the electrodes *c*, and relative circumferential polarization of the rebar $l_p/l_{p,max}$



3. Wyniki badań impedancyjnych

Wyniki badań impedancyjnych stalowego pręta zbrojeniowego w roztworze syntetycznej cieczy porowej betonu zestawiono porównawczo na dziewięciu wykresach Nyquista (Rys. 2).

Wykresy ułożono w formie tablicy złożonej z trzech kolumn i trzech wierszy. Każda kolumna przedstawia wyniki otrzymane przy innej szerokości przeciwelektrody b = 20, 40 i 60. Natomiast każdy z wierszy pokazuje wykresy uzyskane dla trzech różnych odległości między elektrodami mm c = 15, 25 i 35 mm . W celu ułatwienia identyfikacji poszczególnych wyników, na każdym wykresie Nyquista znajduje się schematyczny rysunek ilustrujący analizowaną geometrię układu trójelektrodowego. Ponadto w górnej części rys. 2 zamieszczono legendę wyjaśniająca efekt obniżenia poziomu y cieczy porowej w zbiorniku, skutkujący wymuszeniem zmiany względnego obwodowego zasięgu polaryzacji pręta wyrażonego w procentach.

Wszystkie uzyskane widma impedancyjne przedstawione na dziewięciu wykresach Nyquista mają bardzo zbliżone kształty. Każdy rozkład punktów pomiarowych na płaszczyźnie impedancji zespolonej przypomina fragment spłaszczonego półokręgu (łuku). Można zauważyć generalną tendencję, że łukowe widma zmniejszają swoje umowne promienie wraz ze wzrostem obwodowej polaryzacji zbrojenia. Jest to zgodne z oczekiwaniem, ponieważ przy założeniu stałej wartości oporu przeniesienia ładunku R_t w trakcie całego badania, iloczyn jednostkowego oporu polaryzacji i powierzchni polaryzacji powinien być wielkością stałą.

4. Analiza badań

Do analizy badań impedancyjnych zastosowano elektryczny schemat zastępczy pokazany na rys. 2. Na schemacie rezystancję cieczy porowej charakteryzuje parametr R_s , natomiast opór przeniesienia ładunku przez granicę faz 'metal–roztwór' parametr R_t . Pseudo pojemność warstwy podwójnej na powierzchni stali opisuje element stałofazowy *CPE*.

Prezentację wyników analizy obliczeniowej wykonanej aplikacją *Gamry Echem Analyst* według opisanego wyżej schematu ograniczono jedynie do parametru R_t . Wyznaczone wartości oporu przeniesienia ładunku R_t zestawiono porównawczo w tabeli 1. Ze względu na analizowane w badaniach trzy zmienne parametry geometryczne badanego układu, w tabeli ujęto wzajemne relacje pomiędzy szerokością przeciwelektrody *b*, odległością między elektrodami *c* i poziomem cieczy w zbiorniku *y*. W celu pokazania bezpośredniego powiązania pomiędzy poziomem cieczy *y*, zasięgiem obwodowej polaryzacji l_p , maksymalnym zasięgiem obwodowej polaryzacji $l_{p,max} = \pi \times 22$ mm i powierzchnią polaryzacji A_p , wszystkie wymienione parametry zostały wprowadzone do pierwszych trzech wierszy tabeli 1.

3. Results from impedance measurements

Results from impedance measurements conducted for a steel rebar placed in the synthetic concrete pore solution, are compared in nine Nyquist plots (Fig. 2).

The plots were arranged into the chart composed of three columns and rows. The results for different widths of the counter electrode b =20, 40 and 60 are entered in each column. The rows show the plots for three different distances between the electrodes c = 15, 25 and 35 mm. Each Nyquist plot shows the schematic drawing with an analysed geometry of the three-electrode system, to facilitate the identification of individual results. Additionally, there is a legend in the upper part of Fig. 2 explaining the effect of reducing the level y of pore water in the container, which caused the forced change in the relative circumferential polarization of the rebar expressed in percentage.

All impedance spectra illustrated in nine Nyquist plots had very similar shapes. Each distribution of measurement points on a complex impedance plane resembled a fragment of the flattened semi-circle (an arc). It may be noticed that conventional diameters of arcs were decreasing as circumferentially polarized area of reinforcement was becoming greater. The above trends meet our expectations because, assuming the constant value of charge transfer resistance R_t during all the tests, the product of elementary polarization resistance and polarization area should be the constant value.

4. Analysis of tests

The equivalent electrical circuit as illustrated in Fig. 2 was used to analyse impedance measurements. In the circuit, the parameter R_s describes the resistance of pore water, whereas the parameter R_t describes the charge transfer resistance through the 'metal-electrolyte' phase boundary. A constant phase element *CPE* represents pseudo-capacity of a double layer on steel surface.

The presented results from the calculation analysis made in *Gamry Echem Analyst* software according to the procedure described above, were limited to only parameter R_t . Determined values of charge transfer resistance R_t are compared in Table 1. As three variable geometric parameters of the system were analysed during the tests, the table presents mutual relationships between the counter electrode width *b*, the distance between electrodes *c*, and liquid level *y* in the container. All the mentioned parameters were entered into three firsts rows of Table 1 to show the direct relationships between liquid level *y*, the range of circumferential polarization $l_{p,max} = \pi \times 22$ mm, and polarization surface area A_p .

Tabela 1. Wartości oporu przeniesienia ładunku R_t w pomiarach impedancyjnych pręta zbrojeniowego w cieczy porowej betonu w funkcji: szerokości przeciwelektrody *b*, odległości między elektrodami *c* i poziomu cieczy w zbiorniku *y*

Table 1. Charge transfer resistance values *R*t from impedance measurements for rebar placed in concrete pore solution over: the counter electrode width *b*, the distance between electrodes *c* and liquid level *y* in the container

<i>y</i> [cm]		0,5	0,0	-0,5	-1,0	-1,5	-2,0
$A_{\rm p}[{\rm cm}^2]$		69,11	69,11	47,25	36,56	26,37	13,47
$l_{\rm p}/l_{\rm p,max}$ [%]		100	100	68	53	38	19
20	15	10,55	7,04	5,85	4,83	2,88	10,55
	25	7,46	4,49	4,20	3,72	3,03	7,46
	35	5,74	4,21	3,74	3,02	2,06	5,74
40	15	15,20	11,81	10,24	8,44	5,39	15,20
	25	19,35	11,81	9,87	7,65	4,71	19,35
	35	17,28	10,87	9,51	7,43	4,31	17,28
60	15	22,12	11,81	9,14	7,65	4,71	22,12
	25	27,93	14,18	11,33	9,76	6,57	27,93
	35	19,52	12,40	9,63	7,41	5,12	19,52
<i>b</i> [mm]	<i>c</i> [mm]	$R_{\rm t} [{\rm k}\Omega \cdot {\rm cm}^2]$					



Rys 3. Zależność między oporem przeniesienia ładunku R_{t} a powierzchnią obwodowej polaryzacji pręta A_{p} , szerokością przeciwelektrody *b* i odległością *c* między elektrodami

Fig. 3 Relationship between charge transfer resistance R_t and polarized surface area of rebar circumference A_p , the counter electrode width *b* and distance *c* between electrodes

W celu wykazania ewentualnych zależności między uzyskanymi wynikami badań (Tab. 1) na rys. 3 przedstawiono sześć wykresów rozkładu oporu przeniesienia ładunku R_t w funkcji powierzchni polaryzacji obwodowej A_p . Lewa kolumna wykresów na rys. 3 prezentuje zależność R_t (A_p) przy stałych odległościach *c* między elektrodami, natomiast prawa kolumna przy stałych szerokościach przeciwelektrod *b*. Każdy punkt na długości poszczególnych rozkładów uzyskano przy innej obwodowej polaryzacji zbrojenia, co schematycznie pokazano na wykresach (Rys. 3c i 3f) w formie rysunków przekrojów poprzecznych pręta z procentem polaryzacji w środku.

Analiza wykresów na rys. 3 wykazuje, że w przypadku polaryzacji przez płaską przeciwelektrodę stopniowo zwiększających się fragmentów walcowej powierzchni elektrody badanej występują jedynie nieznaczne zaburzenia w oczekiwanej liniowej zależności między oporem przeniesienia ładunku R_t a powierzchnią polaryzacji A_p . Dotyczą one głównie punktów charakteryzujących pełną 100% polaryzację pobocznicy walcowej próbki stali (Rys. 3a, 3b, 3f). W przypadku zmiennej odległości *c* między elektrodami rozkłady punktów (Rys. 3d, 3e i 3f) pokrywają się lub przebiegają bardzo blisko siebie i to niezależnie od zastosowanej szerokości *b* przeciwelektrody. Natomiast w przypadku zmiennej szerokości przeciwelektrody (Rys. 3a, 3b, 3c) rozkłady są zbliżone dla b = 20 i 40 mm, natomiast wyraźnie przesunięte rozkłady dla najszerszej przeciwelektrody b = 60 mm. Dalej podjęto próbę wyjaśnienia tego zjawiska.

5. Symulacje rozkładów potencjału i linii prądowych

W celu poglądowego przedstawienia rozkładów linii prądowych i ekwipotencjalnych w przekrojach poprzecznych badanego układu trójelektrodowego wykonano analizy numeryczne metodą elementów skończonych. Zbudowano dziewięć dwuwymiarowych modeli zakładając, że wpływ na wyniki trzeciego kierunku (wzdłuż osi pręta) jest pomijalny. Każdy model charakteryzował się inną kombinacją parametrów geometrycznych c i b oraz stałym poziomem y cieczy w zbior

Fig. 3 illustrates six plots with the distribution of charge transfer resistance R_t over the area of circumferential polarization A_p to show possible relationships between the obtained results (Table 1). The relationship $R_t(A_p)$ at constant distance *c* between electrodes is shown in the left-column plots in Fig. 3, while the right column presents that relationships at constant width values *b* of the counter electrodes. Each point at the length of individual distributions was obtained at different polarization areas around the reinforcement circumference, which is presented schematically in plots (Figs 3c and 3f) in the form of circles representing rebar cross sections with polarization expressed in percent inside them.

The analysed plots in Fig. 3 show that flat counter electrode used to polarize gradually increasing parts of cylindrical surface of the working electrode caused only minor disorders in the expected linear relationship between the charge transfer resistance R_t and polarization surface area A_p . They mainly refer to points characteristic for the total (100%) polarization of cylindrical side surface of the steel specimen (Figs 3a, 3b, 3f). When distance *c* between the electrodes was changing (Figs 3d, 3e, 3f), the distributed points overlapped or were placed very close to each other regardless of width *b* of the applied counter electrode. However, for variable width of the counter electrode (Figs 3a, 3b, 3c), distribution of points was quite similar to b = 20 and 40 mm, and clearly shifted in case of the widest counter electrode b = 60 mm. The possible explanation for this phenomenon is shown further in the text.

5. Simulated distributions of potential and current lines

Numerical analyses were conducted using the finite element method (FEM) to demonstrate realistic distribution of current and equipotential lines through cross-sections of the tested three-electrode system. Nine two-dimensional models were developed assuming that the impact on third dimension (along the bar axis) was negligible. Each model had different combination of geometric parameters c and b, and the constant level of liquid y in the container. The level y = 0.0 cm adopted



Rys 4. Symulacje numeryczne rozkładu potencjału oraz linii prądowych w przekroju poprzecznym badanego układu przy dziewięciu kombinacjach parametrów geometrycznych *c* i *b* oraz przy stałym poziomie *y* cieczy w zbiorniku

Fig. 4. Numerical simulations for distribution of potential and current lines in the cross-section of the tested system in nine combinations of geometric parameters c and b and the constant liquid level y in the container

niku. Przyjęty w modelach poziom y = 0,0 cm miał symulować maksymalną obwodową polaryzację walcowego pręta. Wyznaczając linie prądowe przebiegające w cieczy porowej pominięto rozkład wewnątrz elementów metalowych, czyli w badanym pręcie i przeciwelektrodzie. Właściwości elektryczne pręta ze stali węglowej i przeciwelektrody ze stali odpornej na korozję przyjęto jak dla przewodników metalicznych: przewodność $\sigma_s=10^8$ S/m, względna przenikalność elektryczna $\varepsilon_s = 1,0$ [2]. Efekt występowania izolacji elektrycznej na pięciu z sześciu powierzchni przeciwelektrody zamodelowano cienką warstwą (0,1 mm) materiału o wysokim oporze (próżnia). W modelu pominięto warstewkę pasywną na obwodzie pręta, ponieważ nie zmieniłaby ona w sposób istotny przebiegu linii prądowych [10]. Syntetyczną ciecz porową scharakteryzowano w modelu przewodnością $\sigma_{cp} = 0.04$ S/m oraz względną przenikalnością elektryczną $\varepsilon_w = 81$ [2]. W nawiązaniu do symulowanych pomiarów impedancyjnych o amplitudzie potencjału 10 mV, do nieizolowanej powierzchni przeciwelektrody przyłożono napięcie 10 mV, natomiast napięcie 0 mV zadano na zewnętrznym obwodzie pręta.

Wyniki analizy MES przedstawiono na rys. 4 w formie dziewięciu map rozkładu potencjału z nałożonymi wektorami energii, których kierunek i zwrot jest zgodny z liniami prądowymi. Linie ekwipotencjalne (bez opisanych wartości) zostały wyznaczone przez granice obszarów o różnych odcieniach szarości. Natomiast linie prądowe przedstawiono w formie cienkich białych kresek przebiegających między przeciwelektrodą i elektrodą badaną.

Głównym celem wykonanej analizy numerycznej była próba wyznaczenia obszaru cieczy aktywnej w przewodzeniu prądów polaryzacyjnych. Aby dokonać takiego oszacowania w każdym z dziewięciu modeli odczytano maksymalną wielkość ładunku przenoszonego przez prąd i arbitralnie założono, że linie prądowe, po których przemieszcza się ładunek stanowiący jedynie 10% wartości maksymalnej, zostaną pominięte. W ten sposób na wszystkich mapkach rys. 4 za pomocą grubej białej linii ciągłej wyznaczono obszar cieczy, w którym przepływa najsilniejszy prąd polaryzacyjny przenoszący około 90% ładunku elektrycznego. W następnym kroku analizy wykonano całkowanie numeryczne aktywnych obszarów cieczy dzieląc je przez całkowitą powierzchnię cieczy wypełniającej w przekroju poprzecznym zbiornik. Wyrażając opisany wyżej stosunek powierzchni w procentach otrzymano wartości w szerokim przedziale od 27 do 58%. Na każdej z dziewięciu mapek rys. 4 w prawym dolnym rogu podano procentową wielkość aktywnego obszaru cieczy. Z porównania wyznaczonych obszarów wynika, że największa powierzchnia występuje w układzie o największej odległości c = 35 mm między elektrodami i o najwężin the models was to simulate the maximum circumferential polarization of the cylindrical bar. While determining current lines in the pore solution, their distribution inside metal elements, that is, in the tested rebar and the counter electrode were neglected. Electrical properties of the rebar made of common steel, and the counter electrode made of corrosion-resistant steel were defined as for metallic conductors: conductivity $\sigma_s = 10^8$ S/m, dielectric constant $\varepsilon_s = 1.0$ [2]. The effect of electric insulation on five out of six surface areas of the counter electrode was simulated with a thin layer (0.1 mm) of high-resistance material (vacuum). The model did not contain a passive layer around the rebar circumference as it would not change significantly the course of current lines [10]. Synthetic pore solution was presented in the model as conductivity $\sigma_{cp} = 0.04$ S/m and dieletric constant $\epsilon_w = 81$ [2]. With reference to simulated impedance measurements with the potential amplitude of 10 mV, the voltage of 10 mV was applied to bare surface area of the counter electrode, and of 0 mV to the external circumference of the rebar.

The analysed results from FEM are shown in Fig. 4 as nine maps of potential distribution with placed energy vectors whose direction and sense are in line with the current lines. The equipotential lines (without marked values) were determined by boundaries of areas marked with various shades of grey. The current lines were shown as thin white lines between the counter electrode and the working electrode.

The numerical analysis was mainly an attempt to determine the area of liquid active in conducting polarization currents. Such an estimation for each nine models was based on the maximum value of charge transferred by current and arbitrary assumption that the current lines transferring charge constituting only 10% of maximum value, were to be neglected. In that way the region of liquid, in which the most powerful polarization current transferring ca. 90% of electric charge was observed, was determined with a thick white line in all the maps in Fig. 4. Another step of analysis involved numerical integration of active regions of liquid by dividing them by the total area of liquid that filled the container at its cross-section. By expressing the above area ratio, we obtained values in a wide range from 27 to 58%. The lower right corner of each of nine maps shown in Fig. 4, provides the active region of liquid expressed in per cents. The comparison of determined regions indicate that the largest surface area was observed in the system with the greatest distance c = 35 mm between the electrodes and the narrowest counter electrode b = 20 mm (Fig. 4c). The least active region of the liquid was noticed in the system with the smallest distance c = 15 mmbetween the electrodes and the medium-width counter electrode b = 40mm (Fig. 4d). Unfortunately, in relation to distinct shift in the distribuszej przeciwelektrodzie b = 20 mm (rys. 4c). Natomiast najmniejsza aktywna powierzchnia cieczy ujawniła się w układzie z najmniejszą odległością c = 15 mm i średnią szerokością przeciwelektrody b = 40mm (Rys. 4d). Niestety w kontekście obserwowanego na wykresach (Rys. 3a, 3b, 3c) wyraźnego przesunięcia rozkładu wartości $R_t(A_p)$ dla najszerszej przeciwelektrody b = 60 mm, przeprowadzona analiza numeryczna MES nie przyniosła oczekiwanego wyjaśnienia. Można jedynie zauważyć, że kształt aktywnej powierzchni cieczy na rys. 4g, 4h, 4i jest nieco bardziej zwężony w części górnej w porównaniu do kształtów otrzymanych dla b = 20 i 40 mm (Rys. 4a÷4f).

6. Podsumowanie

Analiza uzyskanych wyników pokazała, że polaryzacja owalnej elektrody badanej przez płaską przeciwelektrodę w roztworze modelującym ciecz porową betonu może mieć pewien wpływ na oczekiwaną powtarzalność zależności liniowej między oporem przeniesienia ładunku R_t a powierzchnią polaryzacji A_p . W badaniach jako zmienne wybrano dwa parametry geometryczne układu trójelektrodowego (b i c), które również jako zmienne występują w pomiarach polaryzacyjnych zbrojenia w betonie. Parametr c oznaczający odległość w świetle między elektrodą badaną i przeciwelektrodą, a w pomiarach polaryzacyjnych żelbetu utożsamiany z grubością otuliny, zasadniczo nie wpływa na zaburzenia liniowej zależności między R_t i A_p. Natomiast analiza parametru b oznaczającego szerokość przeciwelektrody wykazała, że w przypadku najszerszej przeciwelektrody (b = 60 mm), niezależnie od odległości c, następuje wyraźny spadek wartości R_t widoczny jako przesunięcie w dół liniowego rozkładu $R_t(A_p)$. Nie udało się niestety wyjaśnić przyczyn obserwowanego zjawiska, pomimo wykonanych analiz MES. Nie można też stwierdzić, czy obserwowany trend miał charakter incydentalny, czy też wynikał ze specyfiki zbudowanego układu trójelektrodowego.

tion of values $R_t (A_p)$ observed for the widest counter electrode b = 60mm in the plots (Figs 3a, 3b, 3c), the FEM analysis did not produce the expected solution. A bit narrower shape of the liquid active region in its upper part, as seen in Figs 4g, 4h, 4i, could be observed when compared to the shapes obtained for b = 20 and 40 mm (Figs 4a÷4f).

6. Conclusions

The analysed results demonstrated that the polarization of the oval electrode with the flat counter electrode in the solution simulating concrete pore solution can have some impact on the expected repeatability of linear relationship between charge transfer resistance R_t and polarization area A_p . For the purpose of conducting the tests, we selected as variables two geometric parameters of the three-electrode system (b and c), which were also used as variables while measuring polarization of the reinforcement in concrete. The parameter c representing a distance between the working electrode and the counter electrode edges, and identifying the cover width during polarization measurements of the reinforcement did not generally have the impact on repeatability of the relationship between R_t and A_p . The analysis of the parameter b representing the counter electrode width demonstrated, regardless of distance c, a clear drop in R_t values expressed as downward shift of the linear distribution $R_t(A_p)$ for the widest counter electrode (b) = 60 mm). The reasons for the observed phenomenon remained unclear despite FEM analyses. It cannot not be also found whether the observed trend was incidental or emerged from the specificity of prepared threeelectrode system.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Andrade C., C. Alonso. 1996. "Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site". Construction and Building Materials 10 (5): 315-28.
- [2] Griffiths, David J. 2016. Podstawy elektrodynamiki. PWN.
- [3] Jaśniok Mariusz. 2008. "Analiza porównawcza badań zasięgów polaryzacji zmiennoprądowej na stali zbrojeniowej w warunkach pasywacji i korozji". Ochrona przed Korozją, nr 1:35–41.
- [4] Jaśniok Mariusz. 2013. "Investigation and modelling of the impact of reinforcement diameter in concrete on shapes of impedance spectra". W Procedia Engineering, 57: 456-65. Elsevier.
- [5] Jaśniok Mariusz. 2013. Modelowanie układu stal-beton w pomiarach szybkości korozji zbrojenia metodą spektroskopii impedancyjnej. Monografia, nr 470, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice.
- [6] Jaśniok Mariusz. 2014. "Analysis of the thickness of steel rebars cover in concrete effect on the impedance spectra in the reinforced concrete". Cement Wapno Beton, nr 1: 46-58.
- [7] Jaśniok Mariusz. 2015. "Studies on the Effect of a Limited Polarization Range of Reinforcement on Impedance Spectra Shapes of Steel in Concrete". Procedia Engineering 108: 332-39.
- [8] Jaśniok Mariusz, Tomasz Jaśniok. 2007. "Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Zaawansowane badania elektrochemiczne (cz. IV)". Przegląd Budowlany, nr 7-8: 36-43.

- [9] Lemoine L., F. Wenger, J. Galland. 1990. "Study of the Corrosion of Concrete Reinforcement by Electrochemical Impedance Measurement". W [in:] Berke N.S. et al. (eds.): Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, 118-33. ASTM.
- [10] Matsuoka K., H. Kihira, S. Ito, T. Murata. 1990. "Corrosion Monitoring for Reinforcing Bars in Concrete". W [in:] Berke N.S. et al. (eds.): Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, 103-17. ASTM.
- [11] Song Hawon, Velu Saraswathy. 2007. "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review". International Journal of Electrochemical Science 2: 1-28.
- [12] Tullmin M, L. Mammoliti, R. Sohdi, C. Hansson, B. Hope. 1995. "The Passivation of Reinforcing Steel Exposed to Synthetic Pore Solution and the Effect of Calcium-Nitrite Inhibitor". Cement Concrete and Aggregates 17:134-44.
- [13] Zybura Adam, Mariusz Jaśniok, Tomasz Jaśniok. 2010. "O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetowych". Inżynieria i Budownictwo 66 (10) : 519-25.
- [14] Zybura Adam, Mariusz Jaśniok, Tomasz Jaśniok. 2011. Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu. t. 2. Warszawa: PWN.



PPG Protective &

Marine Coatings

PJG

zapraszamy na naszą stronę internetową: www.ochronaprzedkorozja.pl oraz na Portal Informacji Technicznej:

www.sigma-not.pl



Ekonomiczne







ul. Łużycka 8A 81-537 Gdynia tel. 58 774 99 00 fax 58 774 99 01 sigma.poland@ppg.com