

# Wpływ zasięgu polaryzacji pręta zbrojeniowego na wyniki elektrochemicznych badań korozyjnych

Dr hab. inż. Mariusz Jaśniok, mgr inż. Michael Pamuła, Politechnika Śląska

## 1. Wprowadzenie

W zaawansowanej diagnostyce korozyjnej konstrukcji żelbetowych znajomość tzw. powierzchni polaryzacji zbrojenia osłoniętego przez otulinę betonową jest kluczowa i do chwili obecnej w pełni nierozwiązana. Bez zidentyfikowanej powierzchni polaryzacji, czyli powierzchni czynnej elektrody badanej, nie ma możliwości ilościowej oceny zagrożenia korozją zbrojenia. Opisany problem był wielokrotnie dyskutowany na łamach różnych publikacji [1, 2], jednak jak dotąd nie zwrócono uwagi na potencjalny wpływ na wyniki badań owalnego kształtu elektrody badanej 1 – stalowego pręta zbrojeniowego, do którego w trakcie pomiarów dochodzą prądy polaryzacyjne z płaskiej przeciwelektrody 2 (rys. 1). Zbliżony do opisanego problem badawczy, ale w odniesieniu do elektrod o niewielkich rozmiarach i umieszczonych w naczynku pomiarowym, był dyskutowany w pracy [3]. Autorzy artykułu prowadząc badania i symulacje modelowe pomiarów impedancyjnych, przeanalizowali różne kształty oraz wzajemne usytuowanie elektrod referencyjnych, a także elektrod badanych i przeciwelektrod stwierdzając, że w wielu przypadkach ma to wpływ na wyniki badań. Dlatego też w niniejszym artykule podjęto próbę eksperymentalnej oceny wpływu na wyniki badań impedancyjnych polaryzacji różnych fragmentów pobocznic walcowego pręta zbrojeniowego. W badaniach zmienny zasięg polaryzacji różnicowano po obwodzie pręta, a nie jak zazwyczaj w tego typu pomiarach w kierunku jego długości – por. [4, 5, 6].

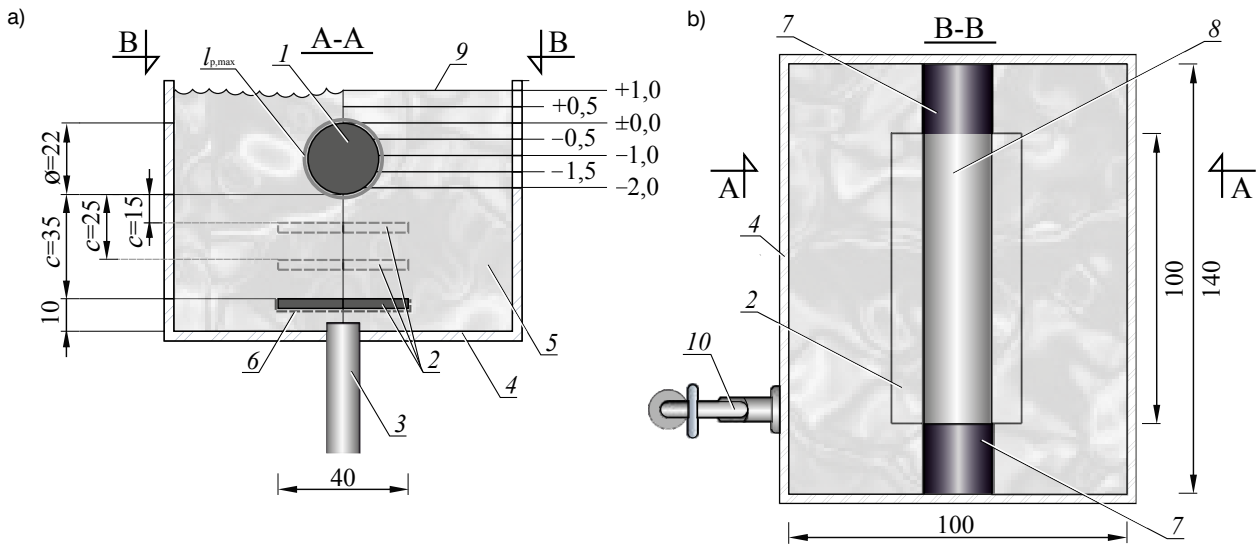
## 2. Stanowisko pomiarowe i przebieg badań

Badania doświadczalne przeprowadzono na stanowisku pomiarowym pokazanym na rysunku 1. Układ pomiarowy składał się z trzech elektrod: badanej 1, pomocniczej 2 i referencyjnej 3. Elektrody umieszczono w pojemniku 4 z tworzywa sztucznego w kształcie prostopadłościanu o wymiarach wewnętrznych 140×100×90 mm. Pojemnik wypełniono wodą wodociągową 5 o pH = 7,6, modelującą

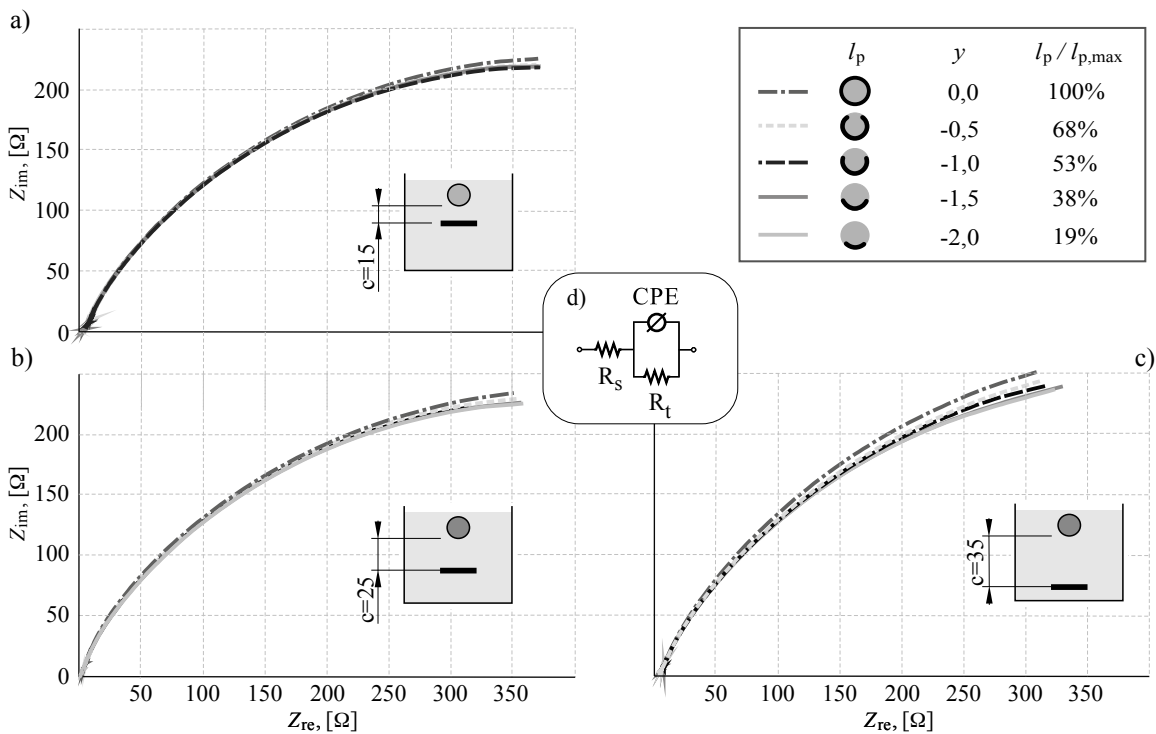
ciecz porową betonu silnie zobojętnionego (karbonatyzacja może obniżyć pH do 8,3). W płytce dennej pojemnika wykonano otwór, przez który wprowadzono elektrodę referencyjną 3 (Cl<sup>-</sup>/AgCl, Ag). Budowa elektrody chlorosrebrowej umożliwiła wykonywanie pomiarów potencjału w pozycji od dołu. Na dnie zbiornika ustabilizowano prostokątną przeciwelektrodę 2 o wymiarach 100×40×2 mm wykonaną ze stali odpornej na korozję. W celu kontrolowania przepływu prądu elektrycznego w trakcie pomiaru wszystkie powierzchnie przeciwelektrody 6, za wyjątkiem jednej, zaizolowano elektrycznie. Elektrodę badaną 1 wykonano z pręta zbrojeniowego średnicy 25 mm ze stali RB500. W celu uniknięcia niedokładności związanych z pomiarem powierzchni polaryzacji, uźebrowanie pręta zbrojeniowego usunięto w procesie obróbki tokarskiej otrzymując pręt gładki średnicy 22 mm. Oba końce pręta zaizolowano elektrycznie 7 w taki sposób, aby wysokość pobocznic powierzchni czynnej 8 elektrody badanej wynosiła 100 mm.

W badanym układzie pomiarowym (rys. 1) wprowadzono dwa zmienne parametry geometryczne. Pierwszym była odległość  $c$  między elektrodą badaną 1 a przeciwelektrodą 2. Efekt ten uzyskano poprzez wprowadzanie podkładek dystansowych położonych na dnie zbiornika, które podpierały przeciwelektrodę 2. W badaniach przeanalizowano wpływ trzech odległości  $c = 15, 25$  i 35 mm. Drugim zmiennym parametrem geometrycznym układu był zasięg polaryzacji  $l_p$  powierzchni pręta zbrojeniowego, mierzony po jego obwodzie. Technicznie efekt zmiany zasięgu polaryzacji uzyskano poprzez skokowe obniżanie poziomu cieczy 9 w pojemniku 4, stopniowo wypuszczając wodę zaworem 10. W pierwszym etapie pomiarów poziom wody ustalono 10 mm powyżej górnej powierzchni elektrody badanej – por. rysunek 1. Łącznie przeanalizowano siedem poziomów wody, obniżając poziom lustra cieczy co 5 mm. Jako punkt odniesienia przyjęto poziom  $\pm 0,0$  oznaczający zerową grubość warstwy wody nad prętem zbrojeniowym.

Badania przeprowadzono potencjostatem *Gamry Reference 600* w ustalonym zakresie częstotliwości 0,1 Hz–10 kHz, stosując sinusoidalny sygnał zaburzający



**Rys. 1.** Stanowisko pomiarowe: a) przekrój poprzeczny, b) widok z góry – opis w tekście



**Rys. 2.** Wyniki badań impedancyjnych pręta w cieczy w funkcji odległości  $c$  i obwodowego zasięgu polaryzacji  $I_p$

o amplitudzie 10 mV względem potencjału korozyjnego zbrojenia. Przed każdym pomiarem impedancyjnym stabilizowano potencjał korozyjny. Przy ustalonym położeniu przeciwelektrody ( $c = \text{const.}$ ) wykonywano serię siedmiu pomiarów metodą EIS, zmniejszając skokowo poziom cieczy w zbiorniku, który powodował zmniejszenie pola powierzchni poboczniczy stalowej próbki

zbrojenia. Sumarycznie wykonano 21 pomiarów impedancyjnych.

### 3. Wyniki i analiza badań

Wyniki badań zestawiono porównawczo na trzech wykresach Nyquista – rysunek 2. Widma impedancyjne

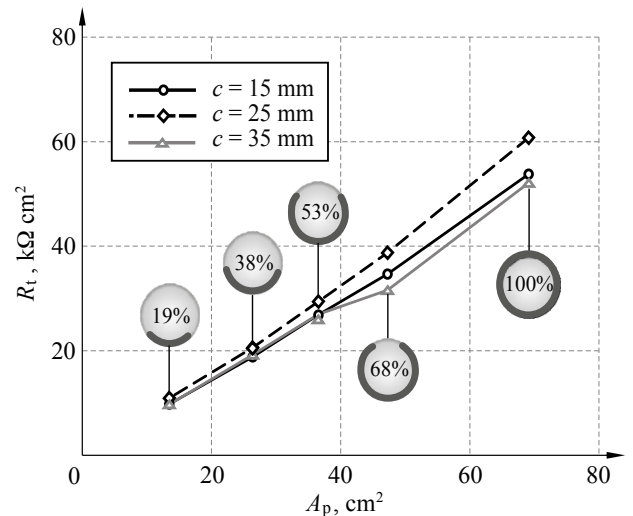
na rysunku 2a uzyskano przy odległości  $c$  między elektrodą badaną 1 i przeciwelektrodą 2 wynoszącej 15 mm, natomiast na rysunku 2b i 2c odpowiednio dla  $c = 25$  i 35 mm. Na każdym z trzech wykresów zestawiono po pięć widm, które charakteryzowały różny zasięg obwodowej polaryzacji  $I_p$ , który schematycznie pokazano w legendzie do rysunku 2. Należy wyjaśnić, że na każdym z wykresów Nyquista zamieszczono jedynie pięć z siedmiu uzyskanych widm, ponieważ rozkłady punktów pomiarowych dla poziomów  $y \geq 0,0$  cm w zasadzie pokrywały się.

Otrzymane widma impedancyjne na rysunku 2 mają bardzo regularny przebieg, a kształtem przypominają fragmenty spłaszczonych półokręgów, co zazwyczaj wskazuje na możliwość rozwoju korozji metalu w roztworze. Dlatego też do analizy otrzymanych widm zastosowano klasyczny układ Randlesa [7] (rys. 2d), w którym kondensator zastąpiono elementem stałofazowym CPE. W schemacie zastępczym na rysunku 2d parametr  $R_s$  oznacza rezystancję roztworu modelującego ciecz porową betonu,  $R_t$  – opór przeniesienia ładunku przez granicę faz, natomiast CPE charakteryzuje pseudopojemność warstwy podwójnej na granicy faz ‘metal-roztwór’.

Ostatecznie prezentację wyników analizy według schematu Randlesa ograniczono do jednego parametru – oporu przeniesienia ładunku  $R_t$ . W białych komórkach tabeli 1 w trzech wierszach zamieszczono obliczone wartości  $R_t$  wyrażone w  $k\Omega \text{ cm}^2$ . Każdy z trzech wierszy tabeli wskazuje na trzy różne odległości  $c$  między elektrodą badaną i przeciwelektrodą. Natomiast kolumny tabeli 1 opisują siedem poziomów  $y$  roztworu wodnego w układzie pomiarowym i odpowiadające mu względne obwodowe zasięgi polaryzacji  $I_p/I_{p, \max}$  wyrażone w procentach.

#### 4. Podsumowanie

W celu ostatecznej oceny ewentualnego wpływu na wyniki badań impedancyjnych polaryzacji różnych fragmentów pobocznic walcowego pręta zbrojeniowego sporządzono wykres pokazany na rysunku 3. Oś pozioma wykresu opisuje powierzchnię polaryzacji  $A_p$  pręta, która jest iloczynem obwodowego zasięgu polaryzacji  $I_p$  i wysokości pobocznic walcowej próbki wynoszącej



**Rys. 3.** Zależność między oporem przeniesienia ładunku  $R_t$  a powierzchnią polaryzacji obwodowej  $A_p$

100 mm. Natomiast oś pionowa wykresu opisuje opór przeniesienia ładunku  $R_t$  uzyskany przy zróżnicowanym poziomie cieczy, który zmniejsza zasięg  $I_p$  obwodowej polaryzacji zbrojenia. Wyniki analizy na rysunku 3 przedstawiono niezależnie dla trzech odległości  $c$  między elektrodami. Jak można zauważyć, w zasadzie niezależnie od odległości  $c$  jak i zasięgu  $I_p$  punkty na wykresie mają przebieg liniowy, z nieznacznym zaburzeniem w kierunku pełnej obwodowej polaryzacji. Obliczony współczynnik korelacji liniowej  $R^2$ , niezależnie dla każdej z trzech grup wyników, osiągnął bardzo wysoką wartość 0,990–0,998. Wskazuje ona na silną zależność liniową. Można więc stwierdzić, że płaska przeciwelektroda polaryzująca fragmenty walcowej elektrody badanej w sposób nieznaczący wpływa na zaburzenie liniowej zależności pomiędzy oporem przeniesienia ładunku a powierzchnią polaryzacji.

Fragmentaryczna polaryzacja pobocznic pręta zbrojeniowego w betonie, w praktyce może wydawać się mało prawdopodobna. Mogłaby jednak wystąpić na przykład w trakcie pomiarów impedancyjnych na częściowo uszkodzonej powłoce epoksydowej zbrojenia. Jednak praktyczne zastosowanie wykonanych badań będzie miało miejsce przy rozbudowie autorskiego modelu układu ‘przeciwelektroda–beton–zbrojenie’ [8, 9, 10].

**Tabela 1.** Opór przeniesienia ładunku  $R_t$  w funkcji odległości  $c$  i obwodowego zasięgu polaryzacji  $I_p$

$y$ [cm]	1,0	0,5	0,0	-0,5	-1,0	-1,5	-2,0	
$I_p/I_{p, \max}$ [%]	100	100	100	68	53	38	19	
$c$ [mm]	15	55,23	54,49	53,79	34,67	26,91	18,83	9,80
	25	54,60	53,30	52,11	31,61	26,96	19,22	9,75
	35	69,80	56,49	60,75	38,75	29,41	20,57	10,94
$R_t$ [k $\Omega$ cm <sup>2</sup> ]								

W modelu tym jednym z głównych elementów układu są krzywoliniowe betonowe ścieżki przewodzenia prądu, które zawierają fragmenty walcowej pobocznicy pręta zbrojeniowego, analogiczne do badanych w niniejszym artykule.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetonowych, Inżynieria i Budownictwo, tom 66, nr 10, s. 519–525, 2010
- [2] M. Jaśniok and T. Jaśniok, Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetonowych. Zaawansowane badania elektrochemiczne (cz. IV), Przegląd Budowlany, nr 7–8, s. 36–43, 2007
- [3] Hsieh G., Experimental limitations in impedance spectroscopy: Part III. Effect of reference electrode geometry/position, Solid State Ionics, tom 96, nr 3–4, s. 153–172, 1997
- [4] Jaśniok M., Analiza porównawcza badań zasięgów polaryzacji

zmiennoprądowej na stali zbrojeniowej w warunkach pasywacji i korozji, Ochrona przed Korozją, nr 1, s. 35–41, 2008

[5] Jaśniok M., Modelowanie układu stal–beton w pomiarach szybkości korozji zbrojenia metodą spektroskopii impedancyjnej, Gliwice, 2013

[6] Lemoine L., Wenger F., Galland J., Study of the Corrosion of Concrete Reinforcement by Electrochemical Impedance Measurement, in [in:] Berke N.S. et al. (eds.): Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, ASTM, 1990, s. 118–133

[7] Feliu V., Gonzalez J. A., Andrade C., Feliu S., Equivalent Circuit for Modelling the Steel-Concrete Interface: I. Experimental Evidence and Theoretical Predictions, Corrosion Science, tom 40, nr 6, s. 975–993, 1998

[8] Jaśniok M., Investigation and modelling of the impact of reinforcement diameter in concrete on shapes of impedance spectra, in Procedia Engineering, 2013, tom 57, s. 456–465

[9] Jaśniok M., Analysis of the thickness of steel rebars cover in concrete effect on the impedance spectra in the reinforced concrete, Cement Wapno Beton, nr 1, s. 46–58, 2014

[10] Jaśniok M., Studies on the Effect of a Limited Polarization Range of Reinforcement on Impedance Spectra Shapes of Steel in Concrete, Procedia Engineering, tom 108, s. 332–339, 2015



# 62. Konferencja Naukowa 11-16 września 2016

Tematyka części ogólnej:

## Budownictwo prefabrykowane w Polsce - stan i perspektywy

#### ORGANIZATORZY

Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej  
Polskiej Akademii Nauk

Komitet Nauki Polskiego Związku  
Inżynierów i Techników Budownictwa

Wydział Budownictwa,  
Architektury i Inżynierii Środowiska  
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
w Bydgoszczy

#### KONTAKT

Wydział Budownictwa,  
Architektury i Inżynierii Środowiska  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
w Bydgoszczy

Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

tel. Sekretariat WBAiŚ: 52 340-85-00

tel. Sekretariat Konferencji: 52 340-85-00

fax: 52 340-80-55

e-mail: [bydgoszcz.krynica@utp.edu.pl](mailto:bydgoszcz.krynica@utp.edu.pl)

[www.bydgoszcz.krynica.utp.edu.pl](http://www.bydgoszcz.krynica.utp.edu.pl)