

# Zagrożenie korozyjne zbrojenia elementów żelbetowych eksploatowanych długotrwale w skrajnie różnych warunkach ekspozycji

Dr inż. Wioletta Raczkiewicz, dr inż. Artur Wójcicki, Politechnika Świętokrzyska

## 1. Wprowadzenie

Konstrukcje żelbetowe eksploatowane długotrwale w różnych warunkach wykazują różne zużycie. Elementy poddane bezpośredniemu oddziaływaniu czynników atmosferycznych i niezabezpieczone przed nimi ulegają ogólnej degradacji najszybciej [1, 2, 3]. Istotne zagrożenia betonu stanowią: dwutlenek węgla zawarty w powietrzu oraz rozpuszczone w wodzie chlorki pochodzące ze środków odladzających. Czynniki te, spotęgowane przez zmiany temperatury i wilgotności otoczenia, a także uszkodzenia mechaniczne, doprowadzają do utraty właściwości ochronnych lub nawet zniszczenia warstwy otuliny betonowej, a w konsekwencji do korozji zbrojenia [2, 4, 5, 6]. Postępująca karbonatyzacja otuliny doprowadza do obniżenia jej pH i uszkodzenia warstwy pasywnej, a w konsekwencji zainicjowania korozji elektrochemicznej na zbrojeniu [2, 5]. Na skutek działania chlorków może dojść do korozji wżerowej przy wysokim pH [2, 5]. W obu tych przypadkach korozja zbrojenia może być znacząca i prowadzić do rozsadzania otuliny od wewnątrz przy jednocześnie niewidocznych uszkodzeniach na zewnątrz. Uszkodzenia otuliny betonowej wynikające z oddziaływań mechanicznych, choć widoczne gołym okiem w postaci pęknięć i ubytków, nie zawsze świadczą o degradacji elementu i niekoniecznie dowodzą zaawansowanego procesu korozji. Znaczenie ma tu czas od momentu powstania uszkodzenia i otaczające warunki podczas eksploatacji [7, 8]. W celu ustalenia poziomu zaawansowania procesów korozyjnych betonu i stali w elementach żelbetowych, zwłaszcza w warunkach polowych, pomocne mogą być nieniszczące badania elektrochemiczne, dzięki którym możliwe jest wskazanie na konstrukcji obszarów objętych korozją oraz oszacowanie stopnia zaawansowania procesu korozyjnego zbrojenia i prognozowanie tempa korozji [4, 8, 9, 10]. Badania te wykonuje się za pomocą specjalistycznych urządzeń pozwalających na pomiar odpowiednich wielkości elektrycznych, których wartości wskazują na stan procesu korozji zbrojenia [8, 9, 10]. W artykule zaprezentowano wyniki z badań elektrochemicznych elementów żelbetowych za pomocą zestawu

pomiarowego GP-5000 GalvaPulse™ [11, 12, 13]. Zasadniczym celem badań była weryfikacja miarodajności wyników pomiarów wzmiankowaną aparaturą i równoległe stwierdzenie różnic postępu korozji w elementach o skrajnie różnej klasie ekspozycji [1]. W związku z tym do badań wybrano elementy narażone na długotrwały wpływ niekorzystnych warunków środowiska – żerdzie elektroenergetyczne (ŻN-bliźniak) oraz elementy eksploatowane w podobnym okresie czasu, ale w korzystnych warunkach otoczenia – wewnętrzne słupy konstrukcji budynku mieszkalnego (S).

## 2. Aparatura badawcza i technika badań

Wykorzystana do pomiarów elektrochemicznych aparatura o nazwie GP-5000 GalvaPulse™ to jedno z niewielu dostępnych na rynku urządzeń służących do badań korozji stali zbrojeniowej w betonie [11, 12]. Najważniejszymi elementami zestawu są: urządzenie sterująco-rejestrujące (minikomputer PSION), srebrowo-chlorowa elektroda odniesienia oraz urządzenie kalibrujące. Do zestawu dołączone jest również oprogramowanie umożliwiające sprawną analizę otrzymanych wyników. Za pomocą zestawu GalvaPulse™ możliwe jest prowadzenie tzw. pomiarów podstawowych, tj. jednoczesny pomiar potencjału stacjonarnego zbrojenia na powierzchni betonu oraz rezystywności otuliny betonowej, dzięki którym możliwe jest wskazanie na konstrukcji obszarów objętych korozją [9] oraz pomiarów rozszerzonych, jeśli dodatkowo wykonuje się pomiary gęstości prądu korozyjnego, co pozwala na oszacowanie stopnia aktywności korozyjnej zbrojenia [10]. Zgodnie z określonymi zasadami [11] pomiary wykonuje się na powierzchni betonu, w uprzednio wyznaczonych punktach, bezpośrednio oczyszczona i nawilżona. Urządzenie musi być skalibrowane. Przed przystąpieniem do pomiarów należy wprowadzić dane dotyczące współrzędnych punktów pomiarowych, wartości natężenia prądu (który doprowadza do polaryzacji zbrojenia), czasu trwania impulsu, parametrów badanego pręta zbrojeniowego (średnicy pręta i długości badanego odcinka) oraz włączenia lub

**Tabela 1.** Kryteria do oceny stopnia zagrożenia korozyjnego zbrojenia

Kryteria do oceny stopnia zagrożenia korozyjnego zbrojenia		
Gęstość prądu korozyjnego, $i_{kor}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	< 0,5	nieprognozowana aktywność korozyjna
	0,5–2,0	nieistotna aktywność korozyjna
	2,0–5,0	niska aktywność korozyjna
	5,0–15,0	umiarkowana aktywność korozyjna
	> 15,0	wysoka aktywność korozyjna
Potencjał stacjonarny zbrojenia, $E_{st}$ [mV]	< -350	95% prawdopodobieństwo korozji
	-350–200	50% prawdopodobieństwo korozji
	> -200	5% prawdopodobieństwo korozji
Rezystywność otuliny betonowej, $\Theta$ [ $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ ]	$\leq 10$	duże prawdopodobieństwo korozji
	10–20	średnie prawdopodobieństwo korozji
	$\geq 20$	małe prawdopodobieństwo korozji

wyłączenia pierścienia ograniczającego zasięg działania elektrody. Do aparatury dołączona jest informacja o kryteriach interpretacji wyników badań (tab. 1). W zależności od uzyskanych wartości potencjału stacjonarnego zbrojenia i rezystywności otuliny betonowej można wnioskować o wielkości prawdopodobieństwa korozji zbrojenia na badanym obszarze, a na podstawie wartości gęstości prądu korozyjnego można oszacować jego aktywność korozyjną.

### 3. Badania doświadczalne metodą impulsu galwanostatycznego

Badaniom poddane zostały dwa rodzaje słupów żelbetowych. Jeden stanowiły żerdzie elektroenergetyczne (ŻN-bliźniak), elementy narażone na bezpośredni i długotrwały wpływ czynników środowiska naturalnego, w tym przede wszystkim negatywny wpływ czynników atmosferycznych. Drugi rodzaj słupów stanowiły żelbetowe słupy będące wewnętrznymi elementami nośnymi konstrukcji szkieletowej budynku (S). Wiek żerdzi oszacowano na ~50 lat. Żerdzie były zbrojone prętami żebrowanymi o średnicy 8 mm. Grubość otuliny betonowej wynosiła średnio 8–10 mm. Zmierzona, metodą sklerometryczną, średnia wytrzymałość betonu tych elementów wyniosła w rejonie badanego obszaru ~37 MPa. Wiek słupów ram nośnych budynku to ~48 lat. Zbrojenie stanowią pręty żebrowane o średnicy 20 mm otulone 20–25 mm warstwą betonu i otynkowane tynkiem cementowo-wapiennym grubości 10–15 mm. Średnia wytrzymałość betonu z pomiarów w rejonach odkrywek wyniosła 55 MPa.

Badania elektrochemiczne polegały na wykonaniu pomiarów wartości: potencjału stacjonarnego zbrojenia, rezystywności otuliny betonowej oraz gęstości prądu korozyjnego w trzech punktach pomiarowych na każdym słupie, zlokalizowanych bezpośrednio nad zbrojeniem głównym i rozmieszczonych co około 30 cm.

Badania żerdzi wykonano w okresie letnim, w porze suchej przy temperaturze otoczenia 27 stopni Celsjusza, natomiast słupów ram w budynku mieszkalnym w listopadzie przy temperaturze wewnątrz budynku około 3 stopni Celsjusza. W obu przypadkach wilgotność otuliny w czasie pomiaru była jednakowa i zgodna z zalecaną dla użytego urządzenia. Wszystkie wyniki pomiarów zostały zapisane i analizowane na podstawie kryteriów zamieszczonych w tabeli 1 [12].

### 4. Analiza uzyskanych wyników

Do czasu badania obiekty były eksploatowane przez około 50 lat. Badaniom poddano żerdzie elektroenergetyczne napowietrznej linii niskiego napięcia (elementy z widocznymi śladami zużycia, narażone na długotrwały wpływ niekorzystnych warunków atmosferycznych sprzyjających korozji) oraz słupy ram nośnych budynku mieszkalnego będącego w stadium remontu po wieloletniej eksploatacji (podczas eksploatacji elementy dobrze osłonięte przed wpływem wody lub wilgoci, otynkowane). Taki dobór badanych elementów umożliwił porównanie wyników badań zagrożenia korozyjnego zbrojenia elementów eksploatowanych w skrajnie różnych warunkach z jednoczesną możliwością miarodajnej, organoleptycznej weryfikacji makroskopowej. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2. Wyniki te analizowano w oparciu o kryteria zamieszczone w [11]. Zgodnie z podaną w [11] nomenklaturą wartości gęstości prądu korozyjnego otrzymane z pomiarów na żerdziach (przedział wartości wyników (0,38; 21,76)) wskazują w żerdzi ŻN1b na wysoką (w jednym punkcie  $i_{kor} = 21,76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), w żerdzi ŻN1a na umiarkowaną (w jednym punkcie  $i_{kor} = 5,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), a w pozostałych żerdziach na nieistotną aktywność korozyjną badanego zbrojenia. Ten sam parametr pozwolił określić aktywność korozyjną zbrojenia w słupach ram (S1–S4) jako „nieprognozowaną” (przedział wartości wyników (0; 0,42)). Na podstawie

**Tabela 2.** Wyniki pomiarów na żerdziach elektroenergetycznych i na słupach ram

Nr słupa	Gęstość prądu korozyjnego, $i_{kor}$ [ $\mu A/cm^2$ ]			Potencjał stacjonarny zbrojenia, $E_{st}$ [mV]			Rezystywność otuliny betonowej, $\Theta$ [k $\Omega \cdot cm$ ]		
	punkt 1	punkt 2	punkt 3	punkt 1	punkt 2	punkt 3	punkt 1	punkt 2	punkt 3
ŻN 1a	2,25	2,99	5,7	-36	29	-86	6,1	10,5	13,9
ŻN 1b	1,76	21,76	4,6	-41	-81	-72	8,2	14,1	13,5
ŻN 2a	1,63	1,2	0,71	-47	-30	-9	5,8	5,0	7,7
ŻN 2b	1,95	1,47	1,49	-7	-10	-10	3,7	6,4	5,4
ŻN 3a	1,61	0,94	1,06	-61	-4	-29	5,8	7,7	6,3
ŻN 3b	1,25	1,31	0,60	-27	-33	-15	6,0	4,7	4,0
ŻN 3c	1,66	1,26	0,38	-54	-47	-1	5,4	4,8	4,0
S 1a	0,05	0,05	0,04	-141	-96	-108	63*	60*	55*
S 1b	0,09	0,11	0,10	1,87	-89	-97	26,5	31	21,5
S 2	0,13	0,07	0,08	-126	1,6	-115	34,6	15,6	26,2
S 3	0,10	0,05	0,07	-134	-81	-85	8,9	20,2	23,6
S 4	0,00	0,42	0,04	-144	-49	-99	9,9	24,7	28,9

\* Wyniki poza zakresem miarodajnych wartości wg [11]

wyników pomiarów drugiego parametru, tj. potencjału stacjonarnego zbrojenia można wnioskować o 5% prawdopodobieństwie korozji dla obu grup elementów. Przedział wartości wyników: żerdzie (-86; 29), słupy (-144; 1,87). Trzeba zauważyć, że ten parametr nie pokazuje precyzyjnie zaobserwowanych w rzeczywistości istniejących różnic w stopniu zużycia zbrojenia lub zagrożeniu korozyjnym obu grup elementów. Trzecia zmierzona wielkość, rezystywność otuliny betonowej, pozwala na wyraźniejsze (jednakże mało precyzyjne) określenie różnic stanu zbrojenia elementów poddanych długotrwałemu wpływowi niekorzystnych warunków zewnętrznych i elementów dobrze „chronionych”. Wartości wyników dla żerdzi elektroenergetycznych (przedział wyników (3,7; 14,1)) wyraźnie wskazują na średnie (4 pkt.) i duże (większość punktów) prawdopodobieństwo korozji zbrojenia żerdzi oraz raczej małe (przedział wyników (20,2;34,6)) lub średnie i duże (3 pkt., przedział wyników (8,9;15,6)) prawdopodobieństwo korozji zbrojenia słupów ram budynku mieszkalnego.

## 5. Podsumowanie

Uzyskane wyniki oraz ich analiza pozwoliły na poniższe wnioski.

1. Porównanie wyników badań elementów żelbetowych eksploatowanych przez kilka dekad w skrajnie różnych warunkach pozwala na weryfikację możliwości i precyzji wnioskowania na podstawie wyników pomiarów użytym urządzeniem.
2. Mierzone parametry w różnym stopniu odzwierciedlają stan zbrojenia i stopień jego zagrożenia korozyjnego.
3. Wyraźne różnice wyników można zauważyć w przypadku wartości gęstości prądu korozyjnego oraz rezystywności otuliny betonowej.

4. Zmierzone wartości potencjału stacjonarnego zbrojenia prowadzą do wniosku o tym samym (5%) prawdopodobieństwie korozji dla obydwóch grup elementów znajdujących się w skrajnie różnym stanie i nie dały miarodajnych efektów.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [2] Ścisłowski Z., Ochrona konstrukcji żelbetowych. Arkady, Warszawa 1999
- [3] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetowych, Inżynieria i Budownictwo, 10/2010, s. 519-525
- [4] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, PWN, Warszawa 2011
- [5] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu. Polski Cement, PWN Warszawa 2010
- [6] Jaśniok M., Jaśniok T., Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (cz. I), Charakterystyka procesu korozji zbrojenia w betonie, Przegląd Budowlany, 2/2007, s. 20-25
- [7] Rusin Z., Technologia betonów mrozoodpornych. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2002
- [8] Czarnecki L., Emmons P.H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Polski Cement, Kraków 2002
- [9] Jaśniok M., Jaśniok T., Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych Podstawowe badania elektrochemiczne (cz. III), Przegląd Budowlany, 6/2007, s. 30-36
- [10] Jaśniok M., Jaśniok T., Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych Zaawansowane badania elektrochemiczne (cz. IV), Przegląd Budowlany, 7-8/2007, s. 36-43
- [11] <http://www.germann.org/TestSystems/GalvaPulse/GalvaPulse.pdf>
- [12] Raczkiwicz W., Zestaw pomiarowy GP-5000 jako przykład aparatury wykorzystywanej do oceny procesu korozji zbrojenia w betonie, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, tom XIX, 1/2014, s. 85-91
- [13] Grzmil W., Raczkiwicz W., Ocena betonu jako otuliny stali zbrojeniowej, Przegląd Budowlany, 5/2014, s. 56-58