

Wybrane aspekty prognozowania poziomu korozji stali zbrojeniowej w betonie metodą elektrochemiczną

Some aspects of the reinforcing steel corrosion level prediction in concrete using electrochemical method

Streszczenie

Korozja stali zbrojeniowej w betonie jest często trudna do wykrycia ze względu na brak widocznych zmian na powierzchni elementów. Pomocne są w tym przypadku nieniszczące metody diagnostyczne. Jedną z nich jest metoda impulsu galwanostaticznego. Metoda ta pozwala ustalić obszary występowania korozji oraz oszacować aktywność korozyjną zbrojenia. W artykule opisano sposób badań przy użyciu zestawu GP-5000 GalvaPulse™. Zestaw ten umożliwia jednoczesny pomiar trzech wielkości: potencjału stacjonarnego zbrojenia, rezystywności otuliny betonowej oraz gęstości prądu korozyjnego, które odniesione do pewnych wartości granicznych pozwalają ocenić zagrożenie korozyjne zbrojenia. W artykule przedstawiono metodykę prowadzenia pomiarów, zaprezentowano przykładowe wyniki badań, przedstawiono sposób ich analizy i wnioski dotyczące możliwości wykorzystania metody w praktyce.

Słowa kluczowe: korozja zbrojenia; element żelbetowy; elektrochemiczne pomiary nieniszczące; aparatura badawcza

Abstract

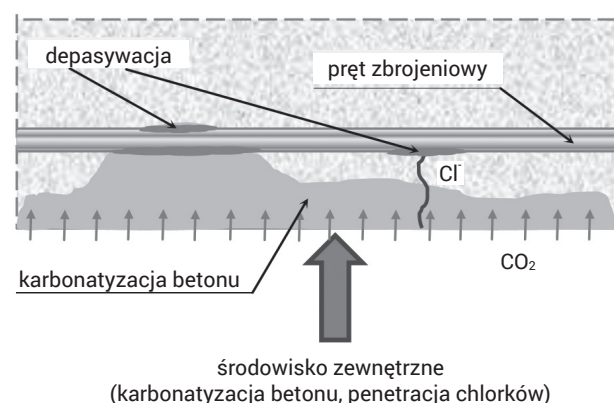
Steel reinforcement corrosion in concrete is sometimes difficult to detect because of the lack of visible changes on the element surface. Therefore some non-destructive methods are used. One of them is the galvanostatic pulse method. This electrochemical method allows to determine the corrosion areas and estimate the steel bars corrosion activity. This article presents a test method by using the GP-5000 GalvaPulse™ set. Using this apparatus it is possible to measure three parameters simultaneously: reinforcement stationary potential, concrete cover resistivity and corrosion current density that referred to the appropriate criteria allow to evaluate the reinforcement corrosion risk. The paper presents the methodology of measurements as well as the experimental test results, the analysis method of them and the conclusions about possibilities of using this method in practice.

Keywords: reinforcement corrosion; reinforced concrete element; non-destructive electrochemical measurements; research apparatus

Wstęp

Elementy żelbetowe eksploatowane często przez wiele lat w różnych warunkach środowiska wykazują zróżnicowane zużycie. Te z nich, które poddane są bezpośredniemu oddziaływaniu czynników atmosferycznych i niewłaściwie zabezpieczone, ulegają ogólnej degradacji najszybciej [1÷4]. Największe zagrożenie dla konstrukcji żelbetowych stanowią dwutlenek węgla zawarty w powietrzu oraz rozpuszczone w wodzie chlorki pochodzące np. ze środków odładzających. Czynniki te, spotęgowane przez zmiany temperatury i wilgotności otoczenia, a także uszkodzenia mechaniczne, powodują zniszczenie otuliny betonowej i tym samym doprowadzają do zapoczątkowania procesów korozyjnych na zbrojeniu (rys. 1) [1÷5].

Na skutek działania dwutlenku węgla i zachodzących procesów fizyko-chemicznych dochodzi do karbonatyzacji betonu, co bezpośrednio wpływa na utratę właściwości ochronnych otuliny względem zbrojenia. Ochronna rola betonu wynika



Rys. 1. Korozja zbrojenia w betonie [autorzy]
 Fig. 1. Reinforcement corrosion in concrete [authors]

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

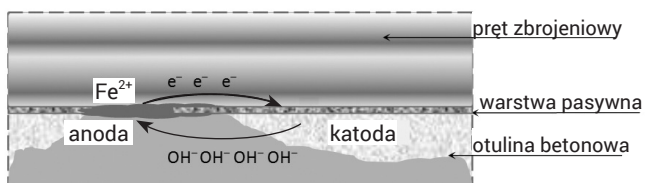
Autor korespondencyjny/Corresponding author: wioLAR@tu.kielce.pl

z jego wysoko alkalicznego odczynu ($\text{pH} \approx 12,5 \div 13,5$), co skutkuje powstaniem na styku betonu i zbrojenia warstwy pasywnej (o bardzo małej przewodności jonowej), która praktycznie nie dopuszcza do korozji prętów. W wyniku karbonatyzacji, pH betonu stopniowo obniża się, a obszary zobojętniałego betonu sięgają coraz głębiej w strukturę elementu docierając aż do warstwy pasywnej. Przy $\text{pH} < \sim 11,8$ warstwa pasywna ulega zniszczeniu, co w efekcie może prowadzić do zainicjowania i rozwoju elektrochemicznej korozji zbrojenia [1÷3,6]. Zdarza się jednak, że do rozwoju korozji dochodzi przy $\text{pH} > 11,8$ [1÷3,7]. Najczęściej przyczyną zniszczenia warstwy pasywnej w takich przypadkach są chlorki, które w postaci rozpuszczonych w wodzie jonów penetrują w głąb porów w strukturze betonu i doprowadzają do korozji wżerowej. Często ma to miejsce w okresie zimowym na skutek stosowania środków odładzających zawierających NaCl oraz cyklicznego zamrażania i odmrażania cieczy w porach betonu. Przyczynić się do tego mogą także pęknięcia czy uszkodzenia mechaniczne [5,8].

Istotne jest, aby proces destrukcji uchwycić w stadium początkowym (niewidocznym jeszcze gołym okiem), kiedy łatwiej i skuteczniej można podjąć działania mające na celu jego ograniczenie i zahamowanie korozji zbrojenia. Duże znaczenie mają zatem wszelkie metody badawcze, które pozwalają na ocenę jakości elementów z betonu we wznoszonych lub już istniejących konstrukcjach szczególnie pod względem poziomu zaawansowania procesów korozyjnych betonu i stali [2].

Badania procesów korozyjnych w betonie prowadzone są głównie w oparciu o dwa rodzaje metod: materiałowe – polegające na badaniu właściwości ochronnych otuliny betonowej na podstawie pobranych z konstrukcji próbek materiałów oraz metody elektrochemiczne – polegające na ocenie zagrożenia korozyjnego zbrojenia [2÷5,9].

Wszystkie elektrochemiczne metody badań wynikają z elektrochemicznego procesu korozji zbrojenia w betonie. Beton ma strukturę porowatą, której pory są wypełnione cieczą o odczynie zasadowym. Można zatem przyjąć, że jest to rodzaj elektrolitu. Stalowy pręt zbrojeniowy jest natomiast elektrodą umieszczoną w elektrolicie. Na skutek różnic stężenia jonów w elektrolicie oraz mikrodefektów w stali, na powierzchni pręta powstają lokalne obszary anodowe i katodowe – mikroogniwa, które inicjują przepływ elektronów, a wypełniony cieczą beton jest nośnikiem jonów (rys. 2).



Rys. 2. Elektrochemiczny proces korozji zbrojenia w betonie [autorzy]
Fig. 2. Electrochemical reinforcement corrosion process in concrete [authors]

Opracowane na tej podstawie semi-nieniszczące elektrochemiczne metody badawcze pozwalają w sposób pośredni ocenić zaawansowanie korozji stali w betonie na podstawie pomiaru pewnych wielkości elektrycznych (które wskazują na trwający proces korozji zbrojenia) [3,10,11] i odniesieniu ich do granicznych wartości kryterialnych. Pomiaru te dotyczą: potencjału stacjonarnego zbrojenia i rezystywności otuliny betonowej mierzonej na powierzchni betonu oraz gęstości prądu korozyjnego. Przy czym pomiary potencjału stacjonarnego zbrojenia i rezystywności otuliny betonowej są pomiarami podstawowymi wskazującymi z pewnym prawdopodobieństwem obszary, na których istnieją warunki sprzyjające korozji. Bardziej miarodajne są tzw. pomiary zaawansowane

polegające na dodatkowych pomiarach gęstości prądu korozyjnego, dzięki którym można oszacować aktywność korozyjną zbrojenia i prognozować jej tempo. W celu właściwego pomiaru gęstości prądu korozyjnego, konieczna jest polaryzacja badanego zbrojenia, czyli doprowadzenie do zaburzenia dynamicznej równowagi układu korozyjnego, jaka panuje na elektrodzie (pręt zbrojeniowy) zanurzonej w elektrolicie (beton o porach wypełnionych cieczą) (rys. 2). Zaburzenie takie można wywołać za pomocą impulsu elektrycznego, a następnie zmierzyć gęstość prądu korozyjnego spowodowaną tym zaburzeniem. W zależności od sposobu generowania impulsu opracowane zostały różne metody polaryzacyjne: metoda elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej (zaburzenie wynika z działania prądu zmiennego w szerokim zakresie częstotliwości), metoda oporu polaryzacji liniowej (zaburzenie jest generowane przez przyłożenie liniowo zmieniającego się potencjału) oraz metoda impulsu galwanostaticznego (zaburzenie jest generowane przez prąd o określonej wartości natężenia) [3,9,11,12]. W niniejszym artykule przedstawiono specyfikę badań prowadzonych metodą impulsu galwanostaticznego [11,13].

Metoda impulsu galwanostaticznego; aparatura galvapulse

Jednym z nielicznych urządzeń, które zaprojektowano do wykonywania pomiarów polaryzacyjną metodą impulsu galwanostaticznego jest zestaw GP-5000 GalvaPulse™ [11,13].

Zestaw ten może być wykorzystany w warunkach laboratoryjnych do badania próbek oraz w terenie do oceny stanu korozyjnego zbrojenia rzeczywistych elementów konstrukcji. Urządzenie pozwala na wykonywanie zarówno pomiarów podstawowych (potencjału stacjonarnego zbrojenia, rezystywności otuliny betonowej), jak i zaawansowanych (potencjału stacjonarnego zbrojenia, rezystywności otuliny betonowej oraz gęstości prądu korozyjnego). Główne elementy zestawu to urządzenie sterująco-rejestrujące (mini-komputer PSION), srebrowo-chlorowa elektroda odniesienia oraz urządzenie kalibrujące. Całość wraz z wyposażeniem dodatkowym mieści się w walizce (rys. 3). Do zestawu dołączona jest informacja o kryteriach interpretacji wyników badań (tabl. I) [13]. W zależności od uzyskanych wartości potencjału stacjonarnego zbrojenia i rezystywności otuliny betonowej można wnioskować o poziomie prawdopodobieństwa korozji zbrojenia na badanym obszarze, a na podstawie wartości gęstości prądu korozyjnego można szacować tempo aktywności procesu korozji.



Rys. 3. Zestaw pomiarowy GP-5000 GalvaPulse™ [autorzy]
Fig. 3. The GP-5000 GalvaPulse™ apparatus [authors]

Tablica I. Kryteria oceny stopnia zagrożenia korozyjnego zbrojenia [13]
Table I. The criteria for assessing the reinforcement risk corrosion degree [13]

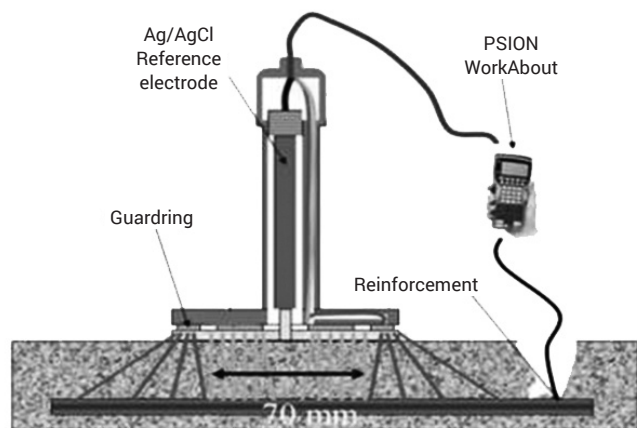
Pomiary zaawansowane	Pomiary podstawowe	Potencjał stacjonarny zbr., E_{st} [mV]	> -200	5% prawdopodobieństwo korozji
			-350÷-200	50% prawdopodobieństwo korozji
			< -350	95% prawdopodobieństwo korozji
		Rezystywność otuliny bet., Θ [k Ω ×cm]	≥ 20	małe prawdopodobieństwo korozji
			10÷20	średnie prawdopodobieństwo korozji
			≤ 10	duże prawdopodobieństwo korozji
	Gęstość prądu korozyjnego, i_{kor} [mA/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	

Badania prowadzone metodą impulsu galwanostatycznie wymagają wykonania pewnych czynności przygotowawczych, do których należą: ustalenie lokalizacji badanego zbrojenia w elemencie, sprawdzenie jego ciągłości na badanym obszarze, wybór miejsca i wykonanie odkrywki zbrojenia na niewielkim odcinku w celu połączenia urządzenia pomiarowego z badanym zbrojeniem, dokładne oczyszczenie i nawilżenie powierzchni (właściwe nawilżenie można kontrolować poprzez pomiar rezystywności betonu; podczas pomiarów nie powinna ona być większa niż 50 k Ω). Urządzenie pomiarowe powinno być właściwie skalibrowane, w tym powinny być zadeklarowane dane dotyczące punktów pomiarowych, średnicy badanego zbrojenia, czasu trwania impulsu i natężenia prądu. Badania dobrze jest prowadzić na obszarze, na którym punkty badawcze rozmieszczone w sposób regularny, co pozwala generować graficzne mapy rozkładu wartości mierzonych parametrów. Schemat połączenia zestawu GP-5000 GalvaPulse™ z badanym zbrojeniem przedstawiono na rysunku 4. Zgodnie ze wskazówkami producenta efektywniej jest wykonać najpierw wstępne pomiary podstawowe na większym obszarze, a następnie, na podstawie uzyskanych wyników, przystąpić do bardziej czasochłonnych pomiarów zaawansowanych na mniejszych obszarach, na których prawdopodobieństwo korozji

(określone w oparciu o pomiary podstawowe) jest większe. Oprogramowanie zainstalowane w minikomputerze PSION (rys. 3), który jest częścią aparatury, umożliwi dokonywanie automatycznych pomiarów oraz odpowiednią archiwizację wszystkich otrzymanych wyników, a także ich podgląd w dowolnym momencie. Po wykonaniu pomiarów możliwa jest transmisja plików wynikowych na komputer stacjonarny z zainstalowanym oprogramowaniem GalvaPulse i ich analiza w tym lub innym programie do obróbki danych. Zgromadzone wyniki można analizować w oparciu o dane stabelaryzowane lub przedstawione w postaci wykresów 2D albo 3D (graficzne mapy rozkładu mierzonych parametrów na badanej powierzchni).

Badania doświadczalne – ocena zaawansowania procesu korozji

W artykule zamieszczono przykładowe wyniki badań doświadczalnych uzyskanych po wykonaniu pomiarów zaawansowanych korozji zbrojenia w wybranym płytowym elemencie żelbetowym o grubości ok. 12 cm. Otulina prętów wynosiła średnio 2 cm. Pomiary wykonano w paśmie płyty w 14 punktach rozmieszczonych w dwóch równoległych rzędach (po siedem punktów w każdym rzędzie). Odstęp między poszczególnymi punktami wynosił ok. 10 cm (rys. 5). Podłączenie aparatury pomiarowej z badanym prętem nie wymagało w tym przypadku wykonania specjalnej odkrywki

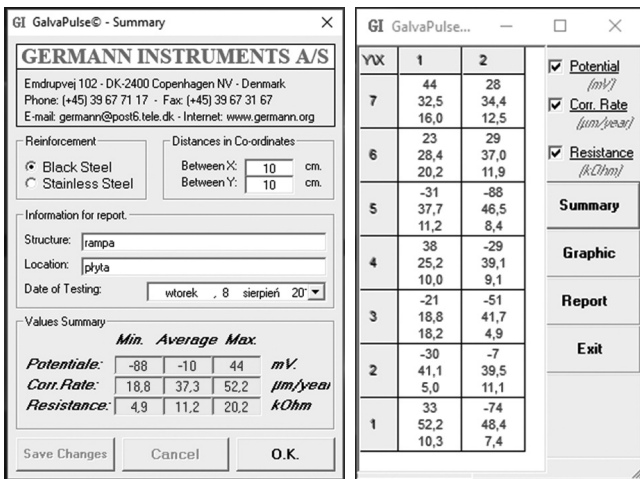


Rys. 4. Schemat podłączenia zestawu GP-5000 GalvaPulse™ do zbrojenia [13]

Fig. 4. Schematic connection of GP-5000 GalvaPulse™ set to the reinforcement [13]



Rys. 5. Pomiary na jednym z badanych elementów [autorzy]
Fig. 5. The measurements on one of the tested elements [authors]



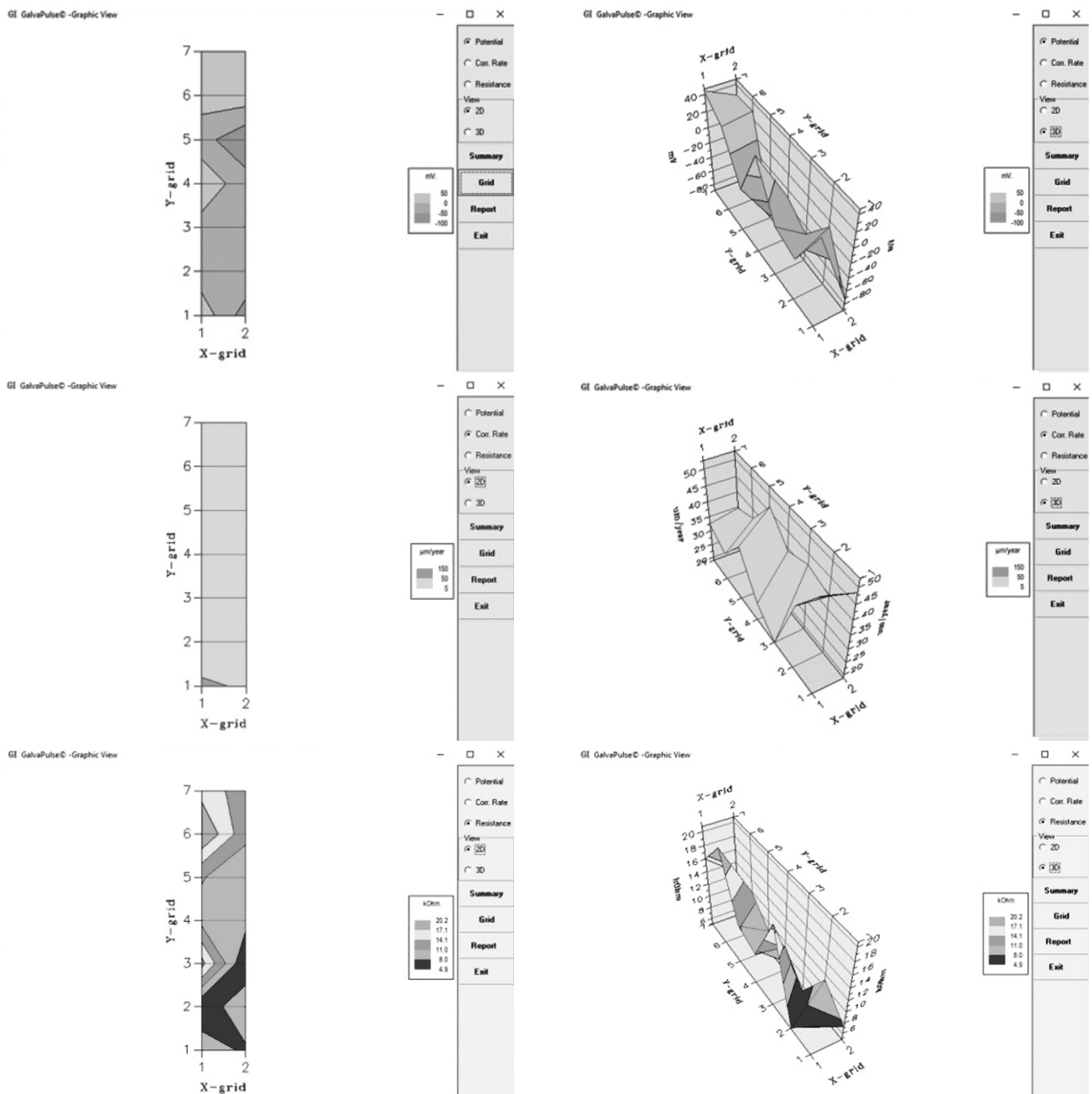
Rys. 6. Wyniki pomiarów wygenerowane w programie GalvaPulse [autorzy]

Fig. 6. Results of obtained measurements made in the GalvaPulse program [authors]

zbrojenia, ponieważ wykorzystano lokalne odspojenie utuliny betonowej, co często ma miejsce w długo eksploatowanych i niewłaściwie zabezpieczonych konstrukcjach z betonu.

W każdym z wyselekcjonowanych punktów pomiarowych zmierzono trzy parametry: potencjał stacjonarny zbrojenia, rezystancję utuliny betonowej oraz gęstość prądu korozyjnego. Na rysunku 6 zamieszczone zostały wygenerowane w programie arkusze wynikowe z podstawowymi danymi na temat badanego elementu oraz z wartościami pomierzonych parametrów dla każdego z punktów o współrzędnych odpowiednio: (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (1,6), (1,7), (2,1), (2,2), (2,3), (2,4), (2,5), (2,6), (2,7).

Rysunek 7 przedstawia natomiast graficzne rozkłady wartości zmierzonych parametrów na badanej powierzchni odpowiednio w wersji 2D i 3D. Na rysunku pokazane zostały wykresy rozkładu wartości potencjału stacjonarnego zbrojenia, gęstości prądu korozyjnego i rezystywności utuliny betonowej dla tego samego badanego obszaru. Pozwala to na jednoczesną szybką analizę wyników i weryfikację wzajemnej ich zgodności.



Rys. 7. Graficzne mapy uzyskanych wyników [autorzy]

Fig. 7. Graphic maps of the obtained results [authors]

Warunki i sposób prowadzenia badań – ograniczenia metody

W czasie badań w laboratorium na próbkach żelbetowych [6,9,14] (wykonywanych wcześniej przez autorów i nieujętych w niniejszym artykule) oraz badań w terenie na rzeczywistych elementach konstrukcji [15], zwrócono uwagę, że na uzyskiwane wyniki mają wpływ zarówno warunki środowiska, jak i sposób wykonywania pomiarów. Duże znaczenie ma np. wilgotność otoczenia. Według zaleceń producenta [13], przed każdą próbą należy intensywnie nawilżyć badaną powierzchnię elementu, co teoretycznie wyklucza wpływ wilgotności na uzyskiwane wyniki. Jednakże nawilżenie elementu, konieczne w celu uzyskania właściwej przewodności elektrycznej materiału, może wpływać na wartości rezystywności otuliny betonowej, co zaobserwowano w czasie pomiarów laboratoryjnych [6,9,14]. Dużym utrudnieniem są również zmiany wilgotności elementów w okresach letnich wpływające na trudności z utrzymaniem wymaganego nawilżenia obszarów badanych podczas pomiarów. Zmiany wilgotności betonu skutkują zmianami w wartościach rezystywności, a to, przy zadanym stałym natężeniu prądu, może doprowadzić do błędnych pomiarów potencjału stacjonarnego. Podczas pomiarów nawilżenie można kontrolować na podstawie pomiaru rezystywności betonu – nie powinna ona być większa niż 50 kΩ.

Badania prowadzone w różnych temperaturach otoczenia (różnice mogą wynosić nawet kilkadziesiąt stopni) [15] sprowokowały także pytanie autorów dotyczące wpływu temperatury na uzyskiwane wyniki. Należy tu rozróżnić sytuacje, kiedy zachodzą istotne zmiany temperatury obiektu (np. silnie schłodzony w warunkach zimowych lub nagrany latem) oraz wpływ warunków zewnętrznych na samą aparaturę badawczą. Przyczynkowo wykonano pomiary tych samych elementów (próbek laboratoryjnych) na zewnątrz (warunki zimowe; temperatura ok. -5 °C) i wewnątrz, tj. w pomieszczeniu o temperaturze pokojowej (ok. 23 °C). Zauważone różnice sugerują możliwość wpływu temperatury na wyniki uzyskiwane stosowaną metodą lub użytą aparaturą. Badania wspomnianej korelacji są obecnie prowadzone przez autorów w Katedrze Wytrzymałości Materiałów Konstrukcji Betonowych i Mostowych Politechniki Świętokrzyskiej i będą przedmiotem odrębnych publikacji. Należy też dodać, że oczywiście niemożliwe są pomiary w temperaturze o ujemnych wartościach.

Z dotychczasowych doświadczeń autorów wynika także, że bardzo istotnym elementem badań okazuje się przygotowanie powierzchni obszaru badawczego [6,15]. Jest to ważne przede wszystkim w przypadku elementów starych

o powierzchni, na której znajdują się często nie tylko znaczne nierówności i zanieczyszczenia, ale także czynniki organiczne (mchy lub porosty) uniemożliwiające np. odpowiednie przyleganie elektrody pomiarowej czy równomierne nawilżenie powierzchni. Na podstawie badań terenowych, jak i laboratoryjnych prowadzonych dotychczas w różnych (często skrajnych) warunkach można stwierdzić, że należy zwracać szczególną uwagę na staranne przygotowanie powierzchni otuliny betonowej przed przystąpieniem do pomiarów.

Inne ograniczenie metody wynika z kształtu i wymiarów pierścienia sondy pomiarowej. O ile wymiary bezwzględne w oczywisty sposób ograniczają możliwości pomiarów elementów cienkich (np. krawędzie płyt o wymiarach mniejszych niż sonda), to należy także zauważyć, że niemożliwe jest wykonywanie pomiarów na powierzchniach zakrzywionych (np. słupach o przekroju kołowym) lub profilowanych drobnogabarytowych.

Podczas badań, z różnych względów, pojawia się od czasu do czasu komunikat urządzenia – „please make a new measurement”, co oznacza, że mierzone wartości wykracają poza zakres wartości możliwy do interpretacji i pomiar należy powtórzyć. Nie zawsze jednak wiadomo, jaka jest przyczyna braku odczytów. Jeśli wynika to z lokalnego, wysokiego stopnia skorodowania zbrojenia, należy skorygować ustawienia pomiarowe poprzez zadeklarowanie dłuższego czasu pomiaru i wyższego natężenia prądu. Jeśli ze zbyt słabego nawilżenia powierzchni, należy ją ponownie intensywnie nawilżyć. Powodem może być też wyczerpanie baterii w urządzeniu. Za każdym razem można jedynie zgadywać, co należy poprawić i ponownie, po kilku minutach, wykonać pomiar. Czasami wystarczy przesunąć sondę o kilka centymetrów dalej od pierwotnie wyznaczonego punktu.

Analiza wyników pomiarów przeprowadzonych na różnych elementach i w różnych warunkach wskazuje też w pojedynczych punktach na nieco niespójne, w stosunku do stanu elementu, wyniki pomiarów potencjału stacjonarnego zbrojenia [6,14,15]. Przykładem tego mogą być odczyty potencjału stacjonarnego zbrojenia wskazujące np. na 50% prawdopodobieństwa korozji w punkcie na powierzchni świeżo wykonanej próbki [14].

Jak wcześniej wspomniano, badania podstawowe dają wstępną, zwykle mało precyzyjną informację o wielkości prawdopodobieństwa na badanym obszarze. Z praktyki autorów wynika, że, w celu uzyskania miarodajnych wyników, konieczne jest wykonywanie pomiarów zaawansowanych [6,14,15].

Podsumowanie – wnioski

Prowadzone przez autorów artykułu badania oszacowania poziomu korozji zbrojenia w elementach żelbetowych metodą impulsu galwanostatycznego pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wykorzystanie polaryzacyjnej metody impulsu galwanostatycznego pozwala na ocenę zaawansowania procesu korozji zbrojenia zarówno w elementach laboratoryjnych, jak i w elementach konstrukcji rzeczywistych. W celu uzyskania miarodajnej informacji na temat postępującego procesu korozji należy prowadzić tzw. pomiary zaawansowane, tj. wykonywać jednocześnie pomiary wszystkich trzech parametrów i analizować je kompleksowo. Badania podstawowe dają wyniki tylko szacunkowe, na granicy możliwości wnioskowania.
2. Wyniki uzyskane z przeprowadzonych dotychczas pomiarów oraz ich analiza pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących skuteczności zastosowanej metody badawczej jak i wskazały na możliwość wpływu pewnych czynników na otrzymywane wyniki. Badania elementów próbnych w laboratorium pozwoliły wnioskować o wystarczającej, do celów praktycznych, miarodajności wyników uzyskiwanych zastosowaną metodą. Porównywanie wyników badań elementów

żelbetowych, eksploatowanych przez kilka dekad w skrajnie różnych warunkach środowiska pozwoliły także na weryfikację możliwości i precyzji wnioskowania w sytuacjach właściwych dla badań polowych.

3. Mierzone parametry pozwalają na oszacowanie stopnia zaawansowania korozji zbrojenia z różną precyzją. Jednoznaczne różnice wyników badań elementów są częściej zauważane w przypadku wartości gęstości prądu korozyjnego oraz rezystywności otuliny betonowej. Wartości potencjału stacjonarnego zbrojenia prowadzą w wielu przypadkach do wniosków o tym samym prawdopodobieństwie korozji dla grup elementów znajdujących się w skrajnie różnym stanie i warunkach.
4. Istotnym czynnikiem wpływającym na możliwość i skuteczność wykonywania pomiarów użytą aparaturą jest odpowiednie przygotowanie badanych powierzchni.
5. Na podstawie niektórych wyników pomiarów potencjału stacjonarnego zbrojenia i rezystywności otuliny betonowej uzyskanych z badań na świeżych próbkach, które wskazywały na średnie lub duże prawdopodobieństwo korozji, można wnioskować o niemierności tych pomiarów. Prawdopodobnie wpływ na to mają wciąż zmieniające się właściwości świeżego betonu w funkcji czasu od momentu wykonania elementu.

Literatura

- [1] Ściślewski Z.: Ochrona konstrukcji żelbetowych, Arkady, Warszawa 1999.
- [2] Czarnecki L., Emmons P.H.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków 2002.
- [3] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, PWN, Warszawa 2011.
- [4] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T.: O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetowych, Inżynieria i Budownictwo, 10/2010, s. 519-525.
- [5] Linek M., Nita P.: Ocena stanu technicznego nawierzchni betonowych w województwie świętokrzyskim, Drogownictwo 2015, T.1, Zeszyt 6.
- [6] Raczkiewicz W., Grzmil W.: Ocena betonu jako otuliny stali zbrojeniowej, Przegląd Budowlany, 5/2014, s. 56-58.
- [7] Molendowska A., Wawrzeńczyk J.: Freeze – Thaw Resistance of Air-Entrained High Strength Concrete, Structure and Environment 2017, T. 1, Zeszyt 9, s. 25-33.
- [8] Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W.: Analysis of the microcracking process with the Acoustic Emission method with respect to the service life of reinforced concrete structures with the example of the RC beams, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, T. 63, Zeszyt 1., s. 55-67, PAN, Warszawa 2015.
- [9] Raczkiewicz W.: Nieniszczące metody oceny zagrożenia korozją stali zbrojeniowej w betonie, monografia: Różne aspekty jakości materiałów i procesów stosowanych w budownictwie, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, M70/2015, s. 9-22.
- [10] Jaśniok M., Jaśniok T.: Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Podstawowe badania elektrochemiczne (cz. III), Przegląd Budowlany 6/2007, s. 30-36
- [11] Raczkiewicz W.: Zestaw pomiarowy GP-5000 jako przykład aparatury wykorzystywanej do oceny procesu korozji zbrojenia w betonie, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, T. XIX, 1/2014, s. 85-91.
- [12] 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.
- [13] <http://www.germann.org/TestSystems/GalvaPulse/GalvaPulse.pdf>
- [14] Raczkiewicz W., Michałowska-Maziejuk D.: Badania korozji zbrojenia w elementach betonowych metodą impulsu galwanostatycznego, Inżynieria i Budownictwo, 3/2014, s. 129-132.
- [15] Raczkiewicz W., Wójcicki A., Zagrożenie korozyjne zbrojenia elementów żelbetowych eksploatowanych długotrwale w skrajnie różnych warunkach ekspozycji, Przegląd Budowlany 5/2016, s. 45-47.