

WIOLETTA RACZKIEWICZ<sup>1</sup>  
DOROTA MICHAŁOWSKA-MAZIEJUK<sup>2</sup>

Kielce University of Technology

<sup>1</sup> e-mail: wioLAR@tu.kielce.pl,

<sup>2</sup> d.michalowska@tu.kielce.pl

# THE USE OF NON-DESTRUCTIVE METHOD TO EVALUATE THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL CORROSION OF REINFORCEMENT IN CONCRETE

## Abstract

*The article describes non-destructive electrochemical method that assesses the severity of corrosion of reinforcement in concrete and presents experimental studies carried out in application of this method. The study was conducted on two types of concrete specimens of differing type cement: CEM I and CEM IIIA. The specimens tests were subjected to cycles of freezing and thawing process in a solution of NaCl. Then on the specimens the measurements were carried out, which allowed for the observation of degradation and the development of concrete cover of reinforcing steel corrosion. The measurements were performed with using a test apparatus by which it was possible to determine the existence of corrosion and its severity using three independent parameters: fixed potential and its gradient, the resistivity of concrete cover and densities of the corrosion current. The results obtained enabled the analysis of corrosion occurring in the specimen of reinforced concrete as well as to assess the effectiveness of the apparatus used for the measurement.*

**Keywords:** reinforced concrete, corrosion of reinforcement, non-destructive electrochemical method

## 1. Introduction

Concrete structures are very resistant to the effects of some factors of the external environment. As a result of the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) penetration, the migration of water and dissolved chemicals in it (such as NaCl) and due to significant changes in humidity and temperature (freezing and thawing) concrete is subjected to adverse physical and chemical processes which resulted in losing the protective properties of the reinforcement. Suitable for concrete pH of 12.5 ÷ 13.5 begins to fall, and if it falls below 11 steel loses passivating layer and the process of corrosion begins. Depending on the ambient temperature and humidity, atmospheric oxygen and the penetration of the salt, the process is more or less intensive. On the surface of rebar corrosion products are formed – the reinforcement increases its volume, which in turn leads to the scratch and then loosening the casing [2, 5].

Now, thanks to the modern measuring devices the changes which occur in the reinforced concrete elements can be relatively early captured and possibly corrective measures taken [1]. The assessment of corrosion of the reinforcing steel in concrete

is determined mainly based on two methods: the material method and electrochemical method. There is a separate group of radiographic measurement methods [3, 4, 6].

Materials method involves testing of the concrete. Typically it relates to pH measurement and thereby determines the degree of carbonation of the concrete or measuring the concentration of chloride ions. Using this particular method first of all the cause of corrosion can be determined [3].

And the electrochemical method consists of performing non-destructive testing which allow to specify the areas covered by corrosion and to assess the intensity of corrosion processes. Such a method was used in the studies presented in this article using test GalvaPulse equipment. The set of measurement used for testing allows for the determination of corrosion, its severity and to determine the probability of its conduct in using three independent parameters: the steady potential of the reinforcement and its gradient, resistivity of concrete cover and the densities of corrosion current. These parameters are measured simultaneously, which is quite important that two

of them: the steady potential and cover resistivity measurements provide vague and only with the third parameter measurements – densities of the corrosion current gives reliable results. Therefore, such a device is effective in the study, in contrast to the other, in which the measurements on only one (resistivity coatings), or two parameters (resistivity of casing and the steady potential of the reinforcement) [4, 6].

In addition, a set of GalvaPulse GP-500 has a minicomputer with installed software which makes it possible to collect automatically all of the data, a preliminary analysis of the results, view graphical map the distribution of the measured parameters and the ability to perform the reports. All files with the measurements can also be transferred to another computer and analyzed for example in Excel [8].

## 2. Experimental studies

The tests were subjected to two sets of concrete specimens differing in cement kind. 9 specimens were made of concrete CEM I Portland cement and 9 specimens using a metallurgical cement CEM III A, ie cement with increased resistance to chlorides. The specimens were prepared according to the recipe as for concrete C30/37, consistency K-5, w/c = 0.43. The specimens had the dimensions of 210x228x100 mm. The reinforcement was used with diameter of 8 mm steel 500th BST. Each sample contained two parallel rods arranged in spaces every 7 cm. Adopted coating was 30 mm. In addition, each group of specimens had 3 150x150x150 mm concrete cubic sample to determine the quality of concrete. All specimens were made and nurtured in the hall with identical laboratory conditions of temperature and humidity.

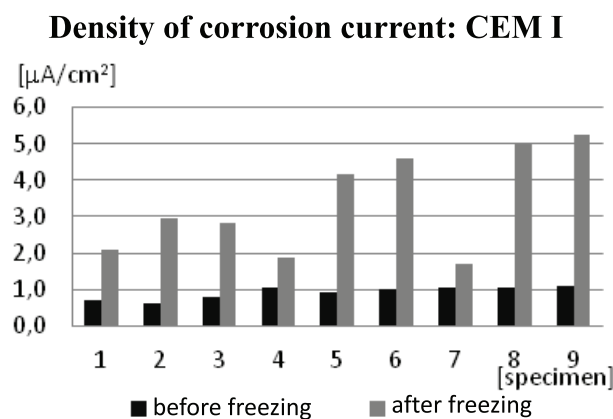
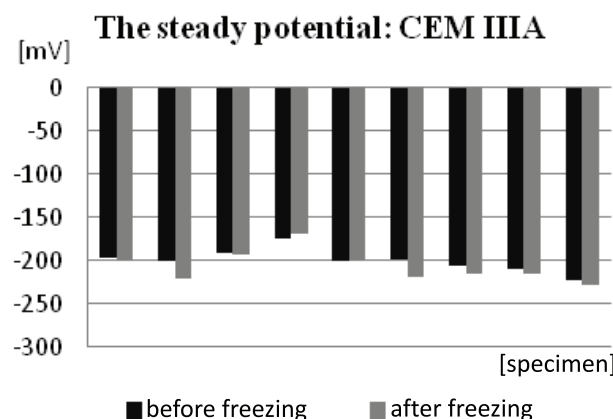
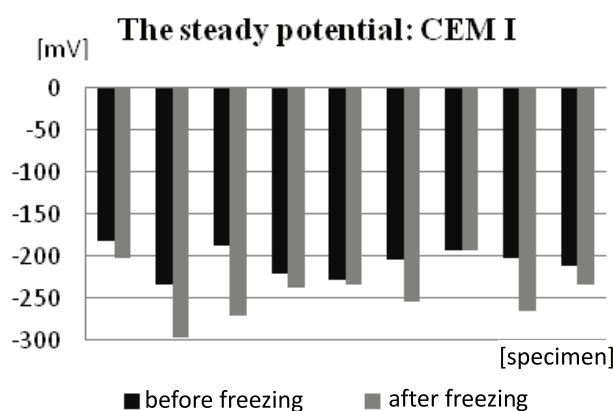
After three months of concreting the initial measurements were proceeded. For this purpose, for each sample four measuring points were determined by means of which a set of GP-500 GalvaPulse measurements of the reinforcement steady potential, the resistivity of concrete cover and the density of corrosion current were made. Then, in order to initiate corrosion processes, the specimen was subjected to 70 cycles of freezing and thawing in a 3% NaCl solution. Immediately after freezing cycles identical specimens were re-tested.

## 3. Analysis of results and conclusions

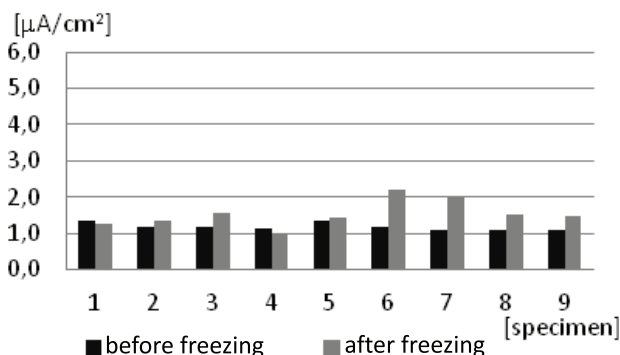
With special software installed in minicomputer of a set of GP-500 measurements were saved automatically. For each sample there was a separate file with the data from the four points. Recorded data were transferred to a computer and analyzed in Excel. The three parameters were subjected to the analysis:

the steady potential, resistivity of concrete cover and density of corrosion current, so that it was possible to determine the existence of corrosion and its severity.

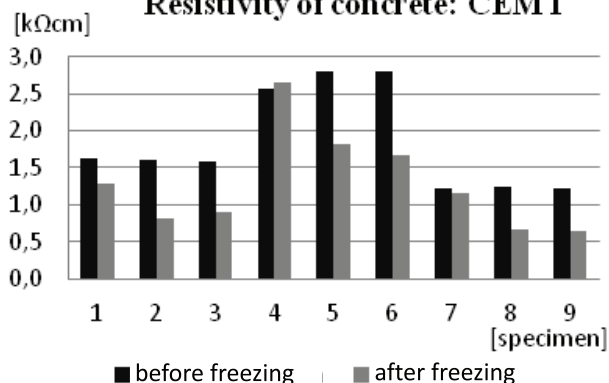
The measured values are presented separately for the specimens taken on the basis of cement CEM I and CEM III and compared to the values measured before freezing specimens (reference measurement) with the corresponding values measured on the same specimens after 70 cycles of freezing and thawing in a solution of NaCl, which enabled to create charts comparison (Fig. 1). Each bar on the chart represents average results of four measurements performed on one specimen.



**Density of corrosion current: CEM IIIA**



**Resistivity of concrete: CEM I**



**Resistivity of concrete: CEM I**

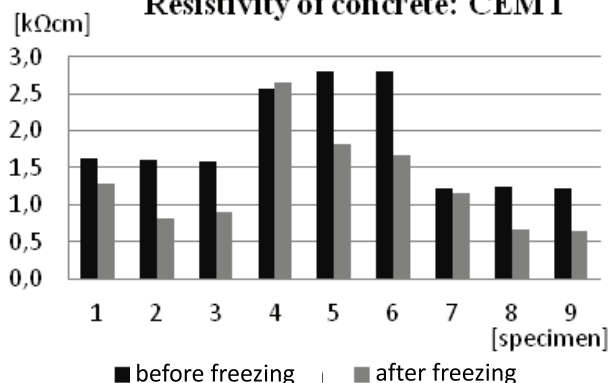


Fig. 1. Measured values of parameters for specimens of cement CEM I and CEM IIIA

Table 1 summarizes the average results of the measurements for the two types of specimen (based on cement CEM I and CEM III) prior to freezing (P1) and after the cycles of freezing (P2). Each result is the average one obtained from the test on 9 specimens.

**Table 1.** The average results of the measurements for the two types of specimen

	icor, mA/cm <sup>2</sup>		Est, mV		Θ, kΩ cm	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2
CEM I	0.92	3.38	-207.11	-243.34	1.85	1.29
CEM IIIA	1.18	1.53	-200.05	-207.10	2.09	2.08

For the correct interpretation of the parameters used in [7] and [8], according to which the risk of corrosion of reinforcement is assessed upon the following criteria:

- a) the value received by steady potential Est:
  - Est < - 350 mV  
for corrosion with a 95%,
  - - 350 mV ≤ Est ≤ - 200 mV  
the probability of the occurrence of corrosion 50%,
  - Est > - 200 mV  
the probability of the occurrence of corrosion of 5%,
- b) the value received by the resistance of concrete cover, Θ:
  - Θ ≤ 10 kΩ cm  
high probability of corrosion,
  - 10 kΩ cm ≤ Θ < 20 kΩ cm  
average probability of corrosion,
  - Θ ≥ 20 kΩ cm  
low probability of corrosion,
- c) values obtained by the density of corrosion current, icor:
  - < 0.5 µA/cm<sup>2</sup>  
not forecasted areas of corrosion activity,
  - 0.5 ÷ 2 µA/cm<sup>2</sup>  
negligible corrosion activity,
  - 2 to 5 µA/cm<sup>2</sup>  
low corrosion activity,
  - 5 to 15 µA/cm<sup>2</sup>  
moderate corrosion activity,
  - 15 µA/cm<sup>2</sup>  
high corrosion activity.

Apparently, the progress of corrosion in density of corrosion current measurements was observed. After 70 cycles of freezing the specimens in a solution of NaCl in the standard value icor specimens of cement CEM I increased from 0.92 to 3.38 mA/cm<sup>2</sup>, means according [8] the reinforcement with "an insignificant corrosion activity" entered into a higher range of "low corrosion activity." The specimen of cement CEM III, this value also increased, but minimally - reinforcement was still "insignificant corrosion activity." Thus, these studies have confirmed the efficiency of CEM III as resistant to chloride salts.

Also the steady potential measurements showing the progress of corrosion of the reinforcement of the specimens CEM I, in which the value has decreased from Est -207.11 to -243.34 mV. This means that although the same amount of "probability of corrosion of 50% occurrence", but with a low value

range is shifted in the direction "of corrosion with probability 95%". For specimen with cement CEM III Est value before freezing and after freezing were almost identical  $\sim -204.00$  [mV] (lower limit "of corrosion with a probability of 50%"), which also confirmed the effectiveness of the cement in concrete exposed to chlorides.

At the same time, these results show that the corrosion progress cannot be predicted only on the basis of this parameter as it is hardly possible that the initial measurements made on the specimens before freezing (stored in the laboratory and exposed to the aggressive environment) have demonstrated "the probability of corrosion of 50%".

Resistivity measurements of concrete cover, for both specimens of cement CEM I and CEM III were  $\sim 1.29 \div 2.09$  k $\Omega$  cm, would suggest a "high probability of corrosion" –  $\Theta \leq 10$  k $\Omega$  cm. However, the values of  $\Theta$  were associated with intense moisturizing of concrete specimen surface, necessary for the proper measurements performance.

#### 4. Conclusions

Based on the results of the analysis the following conclusions can be drawn.

Non-destructive measurements performed by using a set of electro-GP-500 allow to evaluate the severity of corrosion of reinforcement in concrete specimens, but only when all three parameters are measured simultaneously. Measurements of two parameters, including steady potential and reinforcement concrete cover resistivity are less reliable. They may even suggest that more accurate measurements are to be

carried out. However, the measurements of only one parameter – resistivity of concrete cover are completely unreliable for assessing the progress of corrosion of reinforcement.

The use of cement CEM III in specimen of concrete has a significant impact on reducing reinforcement corrosion processes due to both the effect of chloride salts and freezing of specimens.

#### References

- [1] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., *Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali*. PWN, Warszawa 2010.
- [2] M.A. El-Redy, *Steel-Reinforced Concrete Structures*. CRC Press 2008.
- [3] Jaśniok M., Jaśniok T., *Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (cz. I)*. Przegląd Budowlany 2/2007.
- [4] Jaśniok M., Jaśniok T., *Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (cz. III)*. Przegląd Budowlany 6/2007.
- [5] Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*. Polski Cement Kraków, PWN, Warszawa 2010.
- [6] Łakomy T., *Korozja zbrojenia w obiektach mostowych w zależności od stanu betonu w konstrukcji*. Rozprawa doktorska, Warszawa 2009.
- [7] ASTM C-876-91. *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*.
- [8] <http://www.germann.org/TestSystems/GalvaPulse/GalvaPulse.pdf>.

Wioletta Raczkiewicz,  
Dorota Michałowska-Maziejuk

# Wykorzystanie nieniszczącej metody elektrochemicznej do oceny procesu korozji zbrojenia w betonie

## 1. Wprowadzenie

Betonowe elementy konstrukcji są mało odporne na działanie niektórych czynników środowiska zewnętrznego. Na skutek penetracji dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), migracji wody i rozpuszczonych w niej związków chemicznych (np.  $\text{NaCl}$ ) oraz ze względu na istotne zmiany wilgotności i temperatury (zamrażanie i rozmrażanie) beton podlega niekorzystnym procesom fizyko-chemicznym, w wyniku których traci właściwości ochronne względem zbrojenia. Właściwe dla betonu pH rzędu  $12,5 \div 13,5$  zaczyna spadać, a jeśli spadnie poniżej 11, stal traci warstwę pasywującą i rozpoczyna się proces korozji. W zależności od wilgotności i temperatury otoczenia, dostępu tlenu atmosferycznego oraz penetracji soli, proces ten przebiega z większą lub mniejszą intensywnością. Na powierzchni prętów zbrojeniowych powstają produkty korozji – zbrojenie zwiększa swoją objętość, co w efekcie doprowadza do zarysowania, a następnie odpajania się otuliny [2, 5].

Obecnie, dzięki nowoczesnym urządzeniom pomiarowym, można stosunkowo wcześniej uchwycić zmiany, jakie zachodzą w elementach żelbetowych i ewentualnie podjąć środki zaradcze [1]. Ocena zagrożenia korozją stali zbrojeniowej w betonie określana jest głównie w oparciu o dwie metody: materiałową i elektrochemiczną. Odrębną grupę stanowią pomiary metodami radiograficznymi [3, 4, 6].

Metoda materiałowa wiąże się z badaniami betonu. Zwykle dotyczy ona pomiaru pH i tym samym określenia stopnia karbonatyzacji betonu lub pomiaru stężenia jonów chlorkowych. Za pomocą tej metody można przede wszystkim ustalić przyczyny korozji [3].

Metoda elektrochemiczna polega natomiast na przeprowadzeniu nieniszczących badań, które pozwalają określić obszary objęte korozją oraz ocenić intensywność procesów korozyjnych. Taką metodę zastosowano w badaniach przedstawionych w artykule, wykonanych przy wykorzystaniu aparatury badawczej GalvaPulse. Użyty do badań zestaw po-

miarowy umożliwia ustalenie występowania korozji, jej stopnia zaawansowania oraz określenie prawdopodobieństwa jej postępowania w czasie za pomocą trzech niezależnych parametrów, tj. potencjału stacjonarnego zbrojenia i jego gradientu, rezystywności otuliny betonowej oraz gęstości prądu korozyjnego. Parametry te są mierzone jednocześnie, co jest o tyle istotne, że dwa z nich: potencjał stacjonarny oraz rezystywność otuliny dają pomiary mało precyzyjne i tylko wraz z pomiarem trzeciego parametru – gęstości prądu korozyjnego, dają wiarygodne wyniki. Z tego względu urządzenie takie jest skuteczne w badaniach, w przeciwieństwie do innych, w których pomiary dotyczą tylko jednego (rezystywności otuliny), ewentualnie dwóch parametrów (rezystywności otuliny oraz potencjału stacjonarnego zbrojenia) [4, 6].

Dodatkowo, zestaw GalvaPulse GP-500 posiada minikomputer z zainstalowanym oprogramowaniem, dzięki któremu możliwe jest automatyczne gromadzenie wszystkich danych, wstępna analiza uzyskanych wyników, podgląd graficzny map rozkładu mierzonych parametrów oraz możliwość wykonywania raportów. Wszystkie pliki z pomiarami można też przenieść do innego komputera i analizować np. w programie Excel [8].

## 2. Badania doświadczalne

Badaniom poddane zostały dwie grupy żelbetowych próbek różniących się między sobą rodzajem cementu. Wykonanych zostało 9 próbek z betonu na cemencie portlandzkim CEM I oraz 9 próbek z zastosowaniem cementu hutniczego CEM IIIA, tj. cementu o podwyższonej odporności na działanie chlorków. Próbkę wykonano wg receptury jak dla betonu C30/37, konsystencji K-5,  $w/c = 0,43$ . Próbki miały wymiary  $210 \times 228 \times 100$  mm. Jako zbrojenie zastosowano pręty żebrowane o średnicy  $\phi 8$  mm ze stali BST 500. W każdej próbce znajdowały się dwa równoległe pręty, ułożone w rozstawie co 7 cm. Przyjęta otulina wynosiła 30 mm. Dodatkowo, do każdej grupy próbek wykonane zostały po 3 betonowe prób-

ki sześciennie 150 x 150 x 150 mm w celu określenia klasy betonu. Wszystkie próbki były wykonane i pielęgnowane na hali laboratoryjnej w identycznych warunkach temperatury i wilgotności.

Po trzech miesiącach od zabetonowania przystąpiono do pomiarów początkowych. W tym celu na każdej badanej próbce wyznaczone zostały 4 punkty pomiarowe, w których za pomocą zestawu GalvaPulse GP-500 wykonano pomiary potencjału stacjonarnego zbrojenia, rezystywności otuliny betonowej oraz gęstości prądu korozyjnego. Następnie, w celu zainicjowania procesów korozyjnych, próbki poddano 70 cyklom zamrażania i rozmrażania w 3% roztworze NaCl. Bezpośrednio po cyklach mrożenia próbki poddano powtórny identycznym badaniom.

### 3. Analiza wyników i wnioski

Dzięki specjalnemu oprogramowaniu zainstalowanemu w minikomputerze z zestawu GP-500 pomiary zapisywały się automatycznie. Dla każdej próbki powstał oddzielny plik z danymi z czterech punktów pomiarowych. Zapisane dane zostały przetransponowane do komputera i analizowane w programie Excel. Analizie podlegały wartości trzech parametrów: potencjału stacjonarnego, rezystywności otuliny betonowej oraz gęstości prądu korozyjnego, dzięki którym możliwe było ustalenie występowania korozji oraz jej stopnia zaawansowania.

Pomierzone wielkości zestawiono oddzielnie dla próbek wykonanych na bazie cementu CEM I oraz cementu CEM IIIA i porównywano wartości pomiarów przed mrożeniem próbek (pomiar odniesienia) z odpowiednimi wartościami pomierzonymi na tych samych próbkach po 70 cyklach ich zamrażania i rozmrażania w roztworze NaCl, co pozwoliło utworzyć wykresy porównawcze (rys. 1). Każdy słupek na wykresie oznacza uśredniony wynik z czterech pomiarów wykonanych na jednej próbce.

W „Tab. 1” zestawiono średnie wyniki pomiarów dla dwóch typów próbek (na bazie cementu CEM I i CEM IIIA) przed mrożeniem (P1) i po cyklach mrożenia (P2). Każdy wynik to średnia otrzymana z badań 9 próbek.

Do właściwej interpretacji parametrów wykorzystano [7] oraz [8], zgodnie z którymi do oceny stopnia zagrożenia korozyjnego zbrojenia przyjmowane są następujące kryteria:

a) wg otrzymanych wartości potencjału stacjonarnego, Est:

- $Est < -350 \text{ mV}$   
występowanie korozji z prawdopodobieństwem 95%,

- $-350 \text{ mV} \leq Est \leq -200 \text{ mV}$   
występowanie korozji z prawdopodobieństwem 50%,

- $Est > -200 \text{ mV}$   
występowanie korozji z prawdopodobieństwem 5%,

b) wg otrzymanych wartości rezystancji otuliny betonowej,  $\Theta$ :

- $\Theta \leq 10 \text{ k}\Omega \text{ cm}$   
duże prawdopodobieństwo korozji,
- $10 \text{ k}\Omega \text{ cm} \leq \Theta < 20 \text{ k}\Omega \text{ cm}$   
średnie prawdopodobieństwo korozji,
- $\Theta \geq 20 \text{ k}\Omega \text{ cm}$   
małe prawdopodobieństwo korozji,

c) wg otrzymanych wartości gęstości prądu korozyjnego, icor:

- $< 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$   
obszary o nieprognozowanej aktywności korozyjnej,
- $0,5 \div 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$   
nieistotna aktywność korozyjna,
- $2 \div 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$   
niska aktywność korozyjna,
- $5 \div 15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$   
umiarkowana aktywność korozyjna,
- $> 15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$   
wysoka aktywność korozyjna.

Najwyraźniej postęp procesu korozji uwidocznił się w pomiarach gęstości prądu korozyjnego – po wykonaniu 70 cykli mrożenia próbek w roztworze NaCl średnia wartość icor w próbkach z cementem CEM I wzrosła z 0,92 do 3,38  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , czyli wg [8] zbrojenie „o nieistotnej aktywności korozyjnej” weszło w wyższy zakres „o niskiej aktywności korozyjnej”. W próbkach z cementem CEM IIIA wartość tego parametru również wzrosła, ale minimalnie – zbrojenie miało wciąż „nieistotną aktywność korozyjną”. Tym samym badania potwierdziły skuteczność stosowania cementu CEM IIIA, jako odpornego na działanie soli chlorkowych.

Również pomiary potencjału stacjonarnego zbrojenia wykazały postęp korozji w próbkach z cementem CEM I, w których wartość Est spadła z  $-207,11$  do  $-243,34 \text{ mV}$ . Oznacza to wprawdzie ten sam przedział „występowania korozji z prawdopodobieństwem 50%”, ale z dolnego zakresu tego przedziału wartości przesunęły się w kierunku „występowania korozji z prawdopodobieństwem 95%”. Dla próbek z cementem CEM IIIA wartości Est przed mrożeniem i po mrożeniu były prawie identyczne  $\sim -204,00 \text{ mV}$  (dolna granica „występowania korozji z prawdopodobie-

bieństwem 50%”), co również potwierdziło skuteczność stosowania tego cementu w betonach narażonych na działanie chlorków. Jednocześnie wyniki te pokazały, że nie można prognozować postępu korozji tylko na podstawie tego parametru, ponieważ raczej nie jest możliwe, aby pomiary początkowe wykonane na próbkach przed ich mrożeniem (przechowywanych w warunkach laboratoryjnych i nie narażonych na agresywne działanie środowiska) wykazały „występowanie korozji z prawdopodobieństwem 50%”.

Pomiary rezystywności otuliny betonowej, które zarówno dla próbek z cementem CEM I jak i CEM IIIA wynosiły  $\sim 1,29 \div 2,09 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ , mogłyby sugerować „duże prawdopodobieństwo korozji” –  $\Theta \leq 10 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ . Jednak takie wartości  $\Theta$  były związane z intensywnym nawilżaniem betonowej powierzchni próbek, koniecznym do właściwego wykonania pomiarów.

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można sformułować następujące wnioski.

Pomiary wykonywane nieniszczącą metodą elektrochemiczną przy użyciu zestawu GP-500 pozwalają na ocenę stopnia zaawansowania korozji zbrojenia w próbkach betonowych, jednak tylko wtedy, kiedy mierzone są wszystkie trzy parametry jednocześnie. Pomiary dwóch parametrów, w tym potencjału stacjonarnego zbrojenia i rezystywności otuliny betonowej są mniej miarodajne. Mogą ewentualnie sugerować, czy należy przeprowadzić dokładniejsze pomiary. Natomiast zupełnie niemiarodajne do oceny procesu postępu korozji zbrojenia są pomiary tylko jednego parametru – rezystywności otuliny betonowej.

Zastosowanie cementu CEM IIIA w próbkach żelbetowych istotnie wpływa na ograniczenie procesów korozji zbrojenia spowodowanych zarówno działaniem soli chlorkowych, jak i mrożenia i rozmrażania próbek.