

DR INŻ. FAUSTYN RECHA

Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach; Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych; ul. Rolna 43, 42-555 Katowice ORCID:0000-0002-8720-3382;
e-mail: *faustyn.recha@wst.pl*

METODA SZACOWANIA NATĘŻENIA PRĄDU KOROZYJNEGO NA PODSTAWIE UGIĘCIA ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH

s. 57-64

STRESZCZENIE

W pracy podjęto problematykę ugięcia elementów żelbetowych, podlegających wpływom korozji zbrojenia. Praca ma charakter w pełni teoretyczny. Skupiono się na wyprowadzeniu zależności, wiążącej gęstość natężenia prądu korozyjnego z krzywizną ugięcia. W zamyśle przedstawionej metody jest to nowy element, umożliwiający wstępne oszacowanie gęstości prądu korozyjnego w oparciu o bezinwazyjne pomiary ugięć konstrukcji.

SŁOWA KLUCZOWE

korozja stali zbrojeniowej, ugięcie elementów żelbetowych, prąd korozyjny

1. Wprowadzenie

Korozja zbrojenia elementów żelbetowych stanowi problematykę podejmowaną przez szerokie grono badaczy. Trwałość konstrukcji żelbetowych jest bardzo szerokim zagadnieniem, obejmującym aspekty ochrony, diagnostyki, możliwych procesów degradacji oraz metod napraw. Uszkodzenia konstrukcji żelbetowych obejmują degradację otuliny betonowej [1], [2], [3], [4], zmiany granicy plastyczności stali zbrojeniowej [5], [6], czy zmiany sił przyczepności pomiędzy stalą, a betonem [7], [8], [9], [10]. W rezultacie korozja zbrojenia elementów żelbetowych prowadzi do obniżenia ich nośności [11], [12], [13], [14], [15]. Procesy korozyjne w żelbecie obejmują złożoną problematykę, uwzględniając bezpieczeństwo pracy konstrukcji, możliwości użytkowania obiektu, czy aspekty ekonomiczne [16], [17], [18]. Oprócz zaawansowanych metod diagnostycznych konstrukcji żelbetowych [19], [20], [21] widocznymi dla eksperta oznakami degradacji zbrojenia są m.in. zarysowania konstrukcji [22], rdzawe wykwity w miejscu zarysowań, na skutek wynoszenia powstających produktów korozji przez szczelinę rysy [23], czy ugięcia elementu na skutek ubytku masy zbrojenia [13], [24].

W pracy przedstawiono teoretyczny model opisujący postęp ugięcia elementu żelbetowego w rzeczywistym czasie trwania procesów korozyjnych. W oparciu o zaproponowane podejście teoretyczne możliwe jest stworzenie metody szacowania gęstości prądu korozyjnego na podstawie monitoringu elementu żelbetowego. Metoda ta może umożliwić podjęcie decyzji o przeprowadzeniu zaawansowanej diagnostyki konstrukcji znanej z literatury przedmiotu [21]. W literaturze spotyka się dwa kierunki badań procesów korozyjnych: z wykorzystaniem metod przyspieszonych [25], [26], [27], [28], [24], [29] lub poprzez długotrwałe badania elementów w rzeczywistych

warunkach agresji środowiska [13], [30]. Bez względu na przebieg procesu korozyjnego, przedstawia się jego skutek na różnych obszarach rozważań (m. in. degradacji otuliny, zmiany sił przyczepności na styku stali i betonu, czy obniżenia nośności elementu). W niniejszej pracy skupiono się na zagadnieniu odwrotnym, polegającym na wyprowadzeniu gęstości natężenia prądu korozyjnego na podstawie ugięcia elementu żelbetowego, jako jednego z efektów procesu. Przedstawiona koncepcja toku obliczeń jest podejściem nowym, dotąd nie publikowanym w literaturze przedmiotu w środowisku badawczym. Charakter pracy jest w pełni teoretyczny, należy ją zweryfikować w podejściu numerycznym, poprzez symulacje procesów, następnie badania elementów konstrukcyjnych w warunkach laboratoryjnych oraz elementów wbudowanych i eksploatowanych, w rzeczywistych warunkach pracy. Zaproponowana metoda ma bowiem w sposób przybliżony określać gęstość natężenia prądu korozyjnego.

2. Ugięcia elementów żelbetowych

2.1. Podejście normowe

Ugięcia elementów żelbetowych ujęte w obecnie obowiązującej normie [31] są rozpatrywane w dwóch fazach pracy konstrukcji żelbetowej. Pierwsza faza obejmuje etap pracy konstrukcji do chwili zarysowania. Druga faza następuje w momencie pojawienia się zarysowania konstrukcji od obciążeń, będących sumą ciężaru własnego i obciążenia zewnętrznego. W stanie uogólnionym deformację konstrukcji opisuje zależność:

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I \quad (1)$$

gdzie α jest parametrem rozpatrywanej deformacji, natomiast współczynniki α_I , α_{II} są odpowiednio wielkościami deformacji dla I i II fazy pracy przekroju. Parametr ζ pełni funkcję parametru znanego z mechaniki uszkodzeń, uwzględniającego usztywnienie przy rozciąganiu. W zależności od fazy pracy konstrukcji można go definiować jako:

$$\zeta = \begin{cases} 0 & \text{- I faza pracy (przekrój niezarysowany)} \\ 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 & \text{- II faza pracy (przekrój zarysowany)} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie σ_s jest naprężeniem w zbrojeniu rozciągającym w momencie pełnego zarysowania konstrukcji, natomiast σ_{sr} oznacza naprężenie w zbrojeniu rozciągającym, w momencie pełnego zarysowania, jednak wywołanym przez obciążenie, powodujące pierwsze zarysowanie. Parametr β jest współczynnikiem uwzględniającym czas i charakter oddziaływań. W zależności od rodzaju obciążenia parametr ten przyjmuje różne wielkości ($\beta = 1,0$ dla pojedynczego obciążenia krótkotrwałego lub $\beta = 0,5$ dla obciążeń długotrwałych i obciążeń wielokrotnie powtarzalnych). Norma [31] dopuszcza zastąpienie stosunku naprężeń $\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}$ stosunkiem sił wewnętrznych występujących w konstrukcji:

$$\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} = \begin{cases} \frac{M_{cr}}{M} & \text{- w przypadku elementów zginanych} \\ \frac{N_{cr}}{N} & \text{- w przypadku elementów rozciąganych} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie M_{cr} , M oznaczają odpowiednio moment zginający rysujący i moment zginający, faktycznie występujący w elemencie zginanym, natomiast N_{cr} , N oznaczają analogicznie siłę rozciągającą, powodującą zarysowanie oraz siłę rozciągającą rzeczywiście występującą w przekroju. Całkowite odkształcenie betonu, łącznie z uwzględnieniem zjawiska pełzania zgodnie z normą [31], jest ujęte poprzez wprowadzenie efektywnej

wielkości modułu sprężystości betonu $E_{c,eff}$, który wyraża się wzorem:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t)} \quad (4)$$

gdzie: E_{cm} jest średnim modułem sprężystości betonu, natomiast parametr $\varphi(\infty, t)$ współczynnikiem pełzania, zależnym od czasu i rodzaju obciążenia.

Krzywiznę ugięcia elementu żelbetowego spowodowaną skurczem betonu w stanie niezarysowanym $k_{cs,u}$ i stanie zarysowanym $k_{cs,r}$ opisują odpowiednio zależności:

$$k_{cs,u} = \frac{1}{r_{cs,u}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_s}{I_{cu}}, \quad k_{cs,r} = \frac{1}{r_{cs,r}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_s}{I_{cr}} \quad (5)$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}}$$

gdzie: $r_{cs,u}, r_{cs,r}$ są promieniami krzywizn ugięcia elementu od skurczu, I_{cu}, I_{cr} , momentami bezwładności całego przekroju żelbetowego odpowiednio w I i II fazie pracy konstrukcji, ε_{cs} – swobodnym odkształceniem skurczowym, E_s – modułem sprężystości stali zbrojeniowej, S_s – momentem statycznym pola powierzchni rozciąganego zbrojenia, wyznaczonym względem środka ciężkości całego przekroju elementu żelbetowego.

Krzywizny elementu żelbetowego od obciążenia ciężarem własnym i obciążen zewnętrznych w zależności od fazy pracy konstrukcji definiuje się natomiast jako:

$$k_{cu} = \frac{1}{r_{cu}} = \frac{M}{E_{c,eff} I_{cu}}, \quad k_{cr} = \frac{1}{r_{cr}} = \frac{M}{E_{c,eff} I_{cr}} \quad (6)$$

gdzie: k_{cu} jest krzywizną ugięcia elementu w stanie niezarysowanym o promieniu r_{cu} , natomiast k_{cr} krzywizną w stanie zarysowanym, której odpowiada promień r_{cr} .

Całkowita krzywizna ugięcia k_c w stanie niezarysowanym będzie zatem sumą krzywizn od skurczu i od oddziaływań zewnętrznych:

$$k_c = k_{cu} + k_{cs,u} \quad (7)$$

Analogicznie całkowita krzywizna k_r elementu w stanie zarysowanym będzie równa sumie krzywizn składowych po zarysowaniu:

$$k_r = k_{cr} + k_{cs,r} \quad (8)$$

Ostateczną wielkość krzywizny należy traktować jako łączny efekt wpływu skurczu i oddziaływań zewnętrznych, które należy interpolować pomiędzy wielkościami skrajnymi – wyznaczonymi dla I i II fazy, zgodnie z zależnością (1). Ostatecznie w przypadku ugięcia po uwzględnieniu równań (2), (5), (6), (7) i (8) uogólnione równanie (1) będzie odpowiadało postaci zgodnej z [31]:

$$f_s = k_1 l_{eff}^2 [\zeta k_r + (1 - \zeta) k_u] \quad (9)$$

gdzie f_s oznacza ugięcie elementu od ciężaru własnego, obciążeń zewnętrznych i skurczu, k_1 jest parametrem uwzględniającym schemat statyczny analizowanej konstrukcji, natomiast l_{eff} efektywną długością rozpatrywanego elementu konstrukcyjnego wg [31].

2.2. Uwzględnienie wpływu korozji

Rozwijające się procesy korozyjne powodują stopniowy ubytek masy zbrojenia [1], [32], zmianę cech mechanicznych stali (m.in. zmianę granicy plastyczności), [5], [6], [33] oraz zmianę sił przyczepności na styku pomiędzy stalą i betonem [7], [8], [9], [10]. Model, będący przedmiotem analizy zakłada, że wspomniane zjawiska oraz zmiany w module sprężystości stali zbrojeniowej będą powodować w efekcie wyraźne zmiany w ugięciu elementu żelbetowego. W momencie inicjacji i następnie rozwoju procesów korozyjnych na powierzchni zbrojenia, całkowite ugięcie elementu żelbetowego f będzie równe sumie ugięć od obciążeń statycznych i skurczu f_s oraz ugięć f_{corr} , spowodowanych zmniejszeniem pola przekroju zbrojenia, z uwagi na ubytek masy zbrojenia i zmiany modułu Younga, na skutek postępujących procesów korozyjnych:

$$f = f_s + f_{corr} \quad (9)$$

Powyższe ugięcie można powiązać z gęstością natężenia prądu korozyjnego i_{corr} , który występuje na aktywnych korozyjnie obszarach zbrojenia. Parametr ten jest silnie zależny od czynników środowiska zewnętrznego, takich jak temperatura, wilgotność, czy stężenie jonów chlorkowych i przyjmuje wielkość [34], [35]:

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A_b} = 0.0092 \exp(8.37 + 0.618 \ln(1.69 C_{fc})) - \frac{3034}{T} - 0.000105 R_{c,res} + A_1 t^{-0.215} \quad (10)$$

gdzie: A_b jest powierzchnią poboczniczy zbrojenia, na której występują procesy korozyjne w rozpatrywanym czasie t , A_1 - parametrem empirycznym równym $A_1=2.32$ wg [34] lub $A_1=2.35$ wg [35], T - temperaturą, C_{fc} - stężeniem jonów chlorkowych, które oprócz zjawiska depastywacji zbrojenia i inicjacji procesów elektrodowych uwzględniają również wzrost przewodności elektrycznej cieczy porowej betonu. Wilgotność analizowanego obszaru H jest uwzględniana w rezystancji betonu $R_{c,res}$ opisanej zależnością [35]:

$$R_{c,res} = 90.537 H^{-7.2548} [1 + \exp(5 - 50(1 - H))] \quad (11)$$

Na podstawie prawa Faradaya możliwe jest wyznaczenie teoretycznego ubytku masy zbrojenia Δm , przy założeniu efektywnego elektrochemicznego równoważnika stali zbrojeniowej k_{eff} :

$$\Delta m = \int_0^t k_{eff} i_{corr} A_b dt \quad (12)$$

gdzie: Δm jest ubytkiem masy zbrojenia, i_{corr} - natężeniem prądu korozyjnego, natomiast k_{eff} jest średnią wartością elektrochemicznego równoważnika stali zbrojeniowej. Stałą k_{eff} najbezpieczniej jest wyznaczyć w oparciu o analizę grawimetryczną, aby uniknąć rozbieżności pomiędzy elektrochemicznym równoważnikiem czystego żelaza, a faktycznie występującym dla stali zbrojeniowej [1].

Przy założeniu, że korozja ma równomierny rozkład w obszarze analizowanego zbrojenia, a ubytek masy jest jednakowy na poboczniczy prętów, możliwe jest wyznaczenie zmian w średnicy zbrojenia $\Delta\phi_d$:

$$\Delta\phi_d = \sqrt{\frac{4\Delta m}{\rho_{Fe} l_{eff} \pi}} \quad (13)$$

gdzie ρ_{Fe} stanowi gęstość stali zbrojeniowej.

Przyrosty krzywizny elementu zginanego momentem M przed zarysowaniem Δk_u i po zarysowaniu Δk_r , występujące w równaniu (9) po uwzględnieniu postępującego w czasie ubytku masy pręta, ze względu na rozwój procesów korozyjnych w czasie t , zgodnie z równaniem (12) oraz uwzględniającym zmiany modułu Younga stali ujętym w parametrze α_e , w równaniu (5) przyjmą postać:

$$\Delta k_u = \frac{M}{E_{c,eff}(t) \cdot I_{cu}(t)}; \quad \Delta k_r = \frac{M}{E_{c,eff}(t) \cdot I_{cr}(t)} \quad (14)$$

Powyższe równania uwzględniają sytuację, w której do inicjacji procesu korozyjnego dochodzi w I fazie pracy konstrukcji (przed zarysowaniem elementu żelbetowego). Na ich podstawie w oparciu o równania (10), (12), (13) możliwe jest wyprowadzenie zależności wiążącej gęstość natężenia prądu korozyjnego i_{corr} z przyrostem krzywizny ugięcia elementu:

$$i_{corr} = \Delta t \left(\frac{M}{\Delta k_u E_{c,eff}(t) y^2} + \frac{M}{\Delta k_r E_{c,eff}(t) y^2} \right) \frac{\rho_{Fe} l_{eff}}{k_{eff} A_b} \quad (15)$$

gdzie Δt jest przyrostem czasu, w którym rozpatruje się zmiany natężenia prądu korozyjnego, natomiast zmienna y oznacza odległość od środka ciężkości przekroju żelbetowego, do skrajnych włókien rozciąganych.

3. Wnioski

Przedstawiona metodyka podejścia obliczeniowego wyraźnie pokazuje, że istnieje możliwość szacowania gęstości natężenia prądu korozyjnego, na podstawie ugięć elementów konstrukcji. Oryginalnym elementem zaproponowanej metody, jest próba podjęcia rozważenia zagadnienia odwrotnego względem analiz opisywanych w literaturze przedmiotu. Z punktu widzenia diagnostyki konstrukcji, jest to bardzo istotna kwestia, biorąc pod uwagę pierwszą, wstępną ocenę konstrukcji przed podjęciem zaawansowanych metod diagnostycznych [21]. Metoda z zasady ma opierać się wyłącznie na bezinwazyjnym, jednak bardzo rzetelnym pomiarze ugięć konstrukcji. Przedstawiony w pracy wstępny model szacowania gęstości natężenia prądu korozyjnego na podstawie ugięcia elementu żelbetowego ma charakter w pełni teoretyczny. Założenia modelu o równomiernym rozkładzie produktów korozji, a w ślad za tym, jednakowym ubytku masy zbrojenia są daleko posuniętym uproszczeniem, które zastosowano jako punkt wyjścia do dalszej modyfikacji modelu. W kolejnym etapie prowadzonych rozważań planuje się przeprowadzić symulacje numeryczne opisywanego zjawiska. Następnie podjąć weryfikację doświadczalną, w oparciu o wyniki badań elementów analizowanych w warunkach laboratoryjnych oraz rzeczywiście pracujących elementach konstrukcji w obiektach podlegających ciągłej eksploatacji.

Bibliografia

- [1] Krykowski, T., Jaśniok, T., Recha, F., Karolak, M.: A Cracking Model for Reinforced Concrete Cover, Taking Account of the Accumulation of Corrosion Products in the ITZ Layer, and Including. W: *Materials*, vol. 13, no. 23, pp. 1–17, 2020, .
- [2] Michel, A., Pease, B. J., Peterová, A., Geiker, M. R., Stang, H., Thybo, A. E. A.: Penetration of corrosion products and corrosion-induced cracking in reinforced cementitious materials: Experimental investigations and numerical simulations. W: *Cement and Concrete Composites*, vol. 47pp. 75–86, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.04.011.
- [3] Suwito, C., Xi, Y.: The effect of chloride-induced steel corrosion on service life of reinforced concrete structures. W: *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 177–192, 2008, doi: 10.1080/15732470600688699.
- [4] Maaddawy, T. El, Soudki, K.: A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking. W: *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 168–175, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.11.004.
- [5] Almusallam, A. A.: Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. W: *Construction and Building Materials*, vol. 15, no. 8, pp. 361–368, 2001, doi: 10.1016/S0950-0618(01)00009-5.
- [6] Apostolopoulos, C. A., Papadopoulos, M. P., Pantelakis, S. G.: Tensile behavior of corroded reinforcing steel bars BSt 500s. W: *Construction and Building Materials*, vol. 20, no. 9, pp. 782–789, 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.065.
- [7] Fischer, C.: *Auswirkungen der Bewehrungskorrosion auf den Verbund zwischen Stahl und Beton*. Stuttgart, Germany: Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2012.
- [8] Capozucca, R.: Damage to reinforced concrete due to reinforcement corrosion. W: *Construction and Building Materials*, vol. 9, no. 5, pp. 295–303, 1995, .
- [9] German, M., Pamin, J.: FEM simulations of cracking in RC beams due to corrosion progress. W: *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 1160–1172, 2015, doi: 10.1016/j.acme.2014.12.010.
- [10] Alami, E. El, Fekak, F., Garibaldi, L., Moustabchir, H., Elkhalfi, A., Scutaru, M. L., Vlase, S.: Numerical Study of the Bond Strength Evolution of Corroded Reinforcement in Concrete in Pull-Out Tests. W: *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 654, 2022, .
- [11] Altoubat, S., Maalej, M., Shaikh, F. U. A.: Laboratory Simulation of Corrosion Damage in Reinforced Concrete. W: *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 10, no. 3, pp. 383–391, 2016, doi: 10.1007/s40069-016-0138-7.
- [12] Sæther, I., Sand, B.: FEM simulations of reinforced concrete beams attacked by corrosion. W: *Nordic Concrete Research*, vol. 39, pp. 15–32, 2009, .
- [13] Castel, A., Franfois, R., Arliguie, G.: Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams - Part 1 : Experimental study of corroded beams., vol. 33, no. November, pp. 539–544, 2000.
- [14] Recha, F., Krykowski, T Jaśniok, T.: Numeryczna symulacja spadku nośności konstrukcji żelbetowej w wyniku korozji zbrojenia. 15th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, Bratislava, Slovakia, October 19-20, 2017.
- [15] Shen, J., Gao, X., Li, B., Du, K., Jin, R., Chen, W., Xu, Y.: Damage evolution of RC beams under simultaneous reinforcement corrosion and sustained load. W: *Materials*, vol. 12, no. 4, pp. 1–16, 2019, doi: 10.3390/ma12040627.
- [16] Wang, Z., Jin, W., Dong, Y., Frangopol, D. M.: Hierarchical life-cycle design of reinforced concrete structures incorporating durability, economic efficiency and green objectives. W: *Engineering Structures*, vol. 157pp. 119–131, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.022.
- [17] Li, L., Mahmoodian, M., Khaloo, A., Sun, Z.: Risk-Cost Optimized Maintenance Strategy for Steel Bridge Subjected to Deterioration. W: *Sustainability*, vol. 14, no. 436, pp. 1-16, 2022, doi: 10.3390/su14010436

- [18] Recha, F., Nagel, P.: Principles of conducting periodic technical tests of building objects in the field in safety and use. W: *Builder*, vol. 295, no. 2, pp. 12–14, 2022, doi: 10.5604/01.3001.0015.6949.
- [19] Van Steen, C., Verstrynghe, E.: Degradation monitoring in reinforced concrete with 3D localization of rebar corrosion and related concrete cracking. W: *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 15, 2021, doi: 10.3390/app11156772.
- [20] Raczkiewicz, W., Wójcicki, A.: Temperature impact on the assessment of reinforcement corrosion risk in concrete by galvanostatic pulse method. W: *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 3, pp. 13–15, 2020, doi: 10.3390/app10031089.
- [21] Zybura, A., Jaśniok, M., Jaśniok, T.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, t.2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2011.
- [22] Negrutiu, C., Sosa, I. P., Constantinescu, H., Heghes, B.: Crack Analysis of Reinforced High Strength Concrete Elements in Simulated Aggressive Environments. W: *Procedia Technology*, vol. 22, no. October 2014, pp. 4–12, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.01.002.
- [23] Recha, F.: Modeling the degradation of reinforced concrete elements as a result of reinforcement corrosion. PD Thesis. Gliwice, Poland, 2021.
- [24] Grandić, D., Bjegović, D., Grandić, I. Š.: Deflection of reinforced concrete beams simultaneously subjected to sustained load and reinforcement corrosion. W: *Structural Engineers World Congress*, no. 4, 2011.
- [25] Wanyou, Z., Ruiyuan, Z., Lijuan, X.: Corrosion of reinforced concrete in accelerated tests. W: *Advanced Materials Research*, vol. 610–613, no. 3, pp. 485–489, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.485.
- [26] Loukil, O., Adelaide, L., Bouteiller, V., Quiertant, M., Ragueneau, F., Bourbon, X., Trenty: Experimental study of corrosion-induced degradation of reinforced concrete elements., International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Service life of cement-Based Materials and Structures 22-24 August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [27] Bhalgamiya, S., Tivadi, G., Jethva, M.: Techniques for Accelerated Corrosion Test of Steel Concrete for Determine Durability. W: *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 4399–4402, 2018.
- [28] Deb, S.: Accelerated Short-Term Techniques to Evaluate Corrosion in Reinforced Concrete Structures .W: *The Masterbuilder*, no. July , pp. 248–255, 2012, .
- [29] Arredondo-Rea, S. P., Corral-Higuera, R., Gómez-Soberón, J. M., Gámez-García, D. C., Bernal-Camacho, J. M., Rosas-Casarez, C. A., Ungsson-Nieblas, M. J.: Durability parameters of reinforced recycled aggregate concrete: Case study. W: *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 4, 2019, doi: 10.3390/app9040617.
- [30] Vidal, T., Castel, A., François, R.: Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete. W: *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 1, pp. 165–174, 2004, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00246-1.
- [31] Polish Committee of Normalization:, Norm PN-EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and regulations for buildings; Warsaw, 2008.
- [32] Chen, J., Zhang, W., Tang, Z., Huang, Q.: Experimental and numerical investigation of chloride-induced reinforcement corrosion and mortar cover cracking. W: *Cement and Concrete Composites*, vol. 1112020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103620.
- [33] Fiertak, M., Kańka, S.: Właściwości mechaniczne skorodowanej stali zbrojeniowej w betonie trzonu komina przemysłowego. W: *Przegląd Budowlany*, vol. 83, no. 6, pp. 27–29, 2012, .
- [34] Liu, Y.: Modeling the time to corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures. Blacksburg, Virginia, USA, 1996.
- [35] Balafas, I., Burgoyne, C. J.: Environmental effects on cover cracking due to corrosion. W: *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 9, pp. 1429–1440, 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.05.003.

METHOD OF ESTIMATION OF CORROSION CURRENT BASED ON DEFLECTION OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

ABSTRACT

The study takes into account the problem of deflection of reinforced concrete elements subject to the influence of reinforcement corrosion. The work is fully theoretical. The focus was on deriving the dependence linking the corrosion current density with the deflection curvature. In the concept of the presented method, it is a new element that enables preliminary estimation of the corrosion current density based on non-invasive measurements of structure deflections.

KEYWORDS

corrosion of reinforcing steel, deflection of reinforced concrete elements, corrosion current



Artykuł udostępniony na licencjach Creative Commons/ Article distributed under the terms of Creative Commons licenses: Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0). License available: www.creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/