

mgr inż. Przemysław Palacz^{1*)}

ORCID: 0000-0002-2040-3494

dr hab. inż. Maciej Major, prof. PCz¹⁾

ORCID: 0000-0001-5114-7932

Zastosowanie spektrometru XRF do oceny korozyjności zbrojenia w słupie żelbetowym

Application of the XRF spectrometer to assess the corrosiveness of reinforcement in a reinforced concrete column

DOI: 10.15199/33.2023.04.01

Streszczenie. Artykuł zawiera analizę wpływu korozji zbrojenia na zmianę składu chemicznego oraz odczynu pH betonu, który odspoił się od prętów zbrojenia w słupie energetycznym. Badania wykonano za pomocą spektrometru XRF. Wykazano bezpośredni wpływ korozji na zwiększenie zawartości żelaza i tlenku żelaza w betonie w bezpośrednim sąsiedztwie skorodowanego pręta. Dzięki temu możliwa jest ocena konstrukcji żelbetowych z wykorzystaniem spektrometru i eliminacja zagrożenia, jakie powstaje z chwilą korozji zbrojenia.

Słowa kluczowe: beton; korozyjność betonu; trwałość; spektrometr; konstrukcja żelbetowa.

Abstract. The article contains an analysis of the influence of reinforcement corrosion on changes in the chemical composition and its pH of concrete, which detached from the reinforcement bars in power pole. The tests were performed using an XRF spectrometer. The direct impact of corrosion on the increase in the content of iron and iron oxide in concrete in the immediate vicinity of the corroded rod was demonstrated. Thanks to this, it is possible to diagnose reinforced concrete structures with the use of a spectrometer and to eliminate the threat that arises at the moment of reinforcement corrosion.

Keywords: concrete; corrosivity of concrete; durability; spectrometer; reinforced concrete structure.

Coraż większa dostępność spektrometrów umożliwia efektywne ich wykorzystanie w diagnostyce konstrukcji żelbetowych i pozwala na ocenę ich stanu technicznego, wskazanie koniecznych napraw bądź przedstawienie podstaw do wycofania z dalszej eksploatacji. Podstawą bezpieczeństwa pracy konstrukcji żelbetowych jest należyta współpraca zbrojenia stalowego, przenoszącego naprężenia rozciągające, z betonem, który efektywnie przenosi naprężenia ściskające. Beton jest jednym z podstawowych materiałów stosowanych w konstrukcjach budowlanych, który powinien zachowywać swoje właściwości przez możliwie najdłuższy czas eksploatacji [1]. PN-EN 206 wskazuje, że beton powinien być trwały przez co najmniej 50 lat [2]. Podstawowymi czynnikami zewnętrznymi powodującymi jego niszczenie są oddziaływania fizyczne, spowodowane zamrażaniem wody, oddziaływania chemiczne związane z obecnością soli oraz biologiczne. W rzeczywistych warunkach eksplo-

atacji konstrukcji oddziaływania zewnętrzne oraz korozja przebiegają zazwyczaj synergicznie, a uszkodzenia przenikają się nawzajem i potęgują. Pogorszenie właściwości mechanicznych może spowodować zagrożenie konstrukcji [3 ÷ 11]. Dostosowanie do wymagań PN-EN 206 oraz PN-B-06265 jest obecnie obowiązkiem każdego producenta betonu towarowego [12, 13].

Korozja zbrojenia jest główną przyczyną, która powoduje niszczenie konstrukcji żelbetowych. W przypadku, gdy w otulinie zbrojenia pojawiają się zarysowania, odsłaniają drogę do penetracji czynników zewnętrznych i powodują korozję zbrojenia. Ocena stopnia jego korozyjności w różnych żelbetowych konstrukcjach budowlanych może być wykonywana za pomocą spektrometru XRF. Staje się on wówczas narzędziem diagnostyki konstrukcji żelbetowych pracujących w agresywnym środowisku lub w zmieniających się warunkach otoczenia. Takie warunki dotyczą żelbetowych konstrukcji drogowych i przydrożnych w okresie zimy, gdy na drogach pojawia się sól kamienna. Postępująca korozja jest niezauważalna, a jej destrukcyjny wpływ na konstrukcję następuje w bar-

dzo szybkim tempie. Zachodzi zatem konieczność zbadania stopnia korozji zbrojenia w celu oceny bezpieczeństwa pracy drogowych konstrukcji żelbetowych.

Problem korozji zbrojenia dotyczy ponad 85% wszystkich uszkodzeń w konstrukcjach żelbetowych [14]. Wyróżniamy trzy podstawowe czynniki, które powodują korozję zbrojenia, a są nimi: stal, woda i tlen. Eliminując jeden z nich, można zatrzymać reakcję chemiczną korozji i zapobiec przyszłym uszkodzeniom konstrukcji, wywołanym reakcją łańcuchową przez korozję. W wyniku karbonatyzacji betonu polegającej na reakcji chemicznej dwutlenku węgla CO₂ z wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)₂ powstaje kwaśny węglan wapnia Ca(HCO₃)₂, który obniża odczyn pH betonu, oraz woda H₂O. Karbonatyzacja betonu może obniżyć pH betonu od wartości ok. 12,6 w przypadku świeżego betonu do nawet 8,3. Obniżenie pH betonu uniemożliwia ochronę stali przed korozją, a woda będąca produktem reakcji karbonatyzacji powoduje korozję zbrojenia, której produkty zwiększają objętość konstrukcji, co prowadzi do powstania naprężeń rozciągających w betonie. W wyniku tego zaczynają się po-

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: przemyslaw.palacz@pcz.pl

jawiać pęknięcia i odpryski. W przypadku, gdy uszkodzenia są widoczne na zewnątrz konstrukcji, stopień korozji prętów zbrojeniowych jest już na zaawansowanym etapie i proces naprawy może być niemożliwy lub bardzo kosztowny. Odpowiednio wczesne wykrycie korozji stali zbrojeniowej, jej przyczyn i szybkości penetracji, pozwala zastosować właściwe środki ochronne oraz odpowiednio wczesnie zaplanować remont konstrukcji [15 ÷ 17]. Wraz z rozwojem technologicznym, na rynku są obecnie dostępne narzędzia i zestawy pomiarowe do badań podstawowych oraz zestawy do badań zaawansowanych pozwalających na ocenę korozyjności konstrukcji. W artykule przedstawiono analizę składu pierwiastkowego oraz pomiarów pH betonu, który uległ całkowitemu uszkodzeniu w wyniku korozji prętów zbrojeniowych słupa żelbetowego.

Badanie słupa żelbetowego

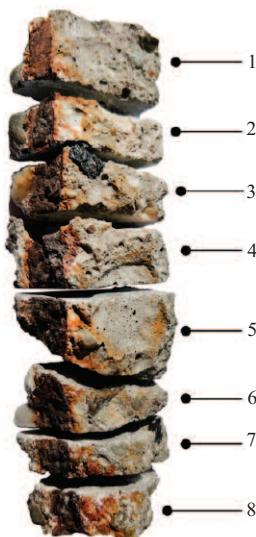
Badaniu poddano żelbetowy słup energetyczny, w którym korozja prętów zbrojeniowych spowodowała pęknięcia i odpryski elementów otuliny zbrojenia. Analizowany słup wraz ze zniszczoną częścią przedstawiono na fotografii 1.



Fot. 1. Żelbetowy słup energetyczny niskiego napięcia – zniszczenie słupa w wyniku korozji

Photo 1. Reinforced concrete low voltage power pole – column failure as a result of corrosion

Ze słupa pobrano próbkę, która odspoiła się w wyniku korozji. Następnie pocięto ją na plastry w celu analizy penetracji rdzy w betonie. Na fotografii 2 przedstawiono pocięty na 8 elementów odspojony fragment słupa, natomiast na fotografii 3a widać korozję pozostałą od zbrojenia oraz pęknięcia i penetrację rdzy w betonie. Przekrój próbki (plastra nr 6) przedstawiono na fotografii 3b.



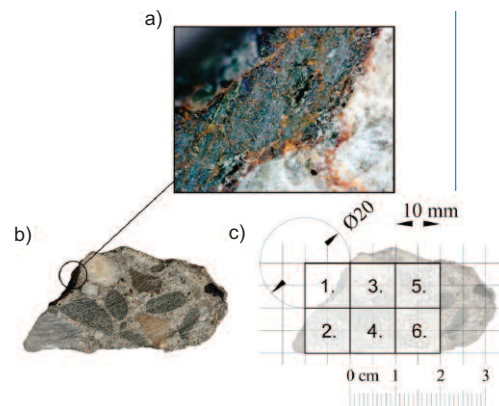
Fot. 2. Fragment próbki betonowej słupa pociętej na 8 plastrów (elementów)

Photo 2. A fragment of a concrete sample of a column, cut into 8 plasters (elements)

Na każdy plaster uzyskany z pociętej próbki nałożono siatkę o boku 1 cm, aby pobrana z plastra próbka (1 – 6) znajdowała się w tej samej odległości od pręta zbrojeniowego. W przypadku plastra nr 6 numeracja próbek z plastra jest widoczna na fotografii 3c. Każdy plaster betonowej próbki pocięto za pomocą przecinarki tarczowej (fotografia 4) na 6 części w analogiczny sposób jak na fotografii 3c.

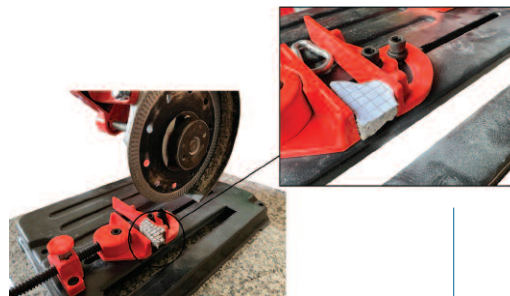
Każdą z sześciu próbek stanowiących część plastra rozdrobnilo w młynku do postaci mączki, którą przesiano przez sito, uzyskując mączkę o wymiarach cząstek mniejszych niż 0,063 mm.

Za pomocą spektrometru fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii (XRF) próbki przebadano pod kątem składu pierwiastkowego w zakresie od sodu (Na-11) w układzie okresowym do uranu (U-92). Po badaniu z każdej próbki zrobiono zaczyn z wodą destylowaną w celu pomiaru pH każdej części plastra betonu, zgodnie z fotografią 3c. Ponadto ze środka badanego słupa po-



Fot. 3. Widok plastra nr 6 badanej próbki betonowej: a) powiększenie styku korozji z płaszczyzną betonu; b) przekrój próbki; c) siatka cięcia oraz numeracja próbek z plastra

Photo 3. View of the slice No. 6 of the tested concrete sample: a) magnification the corrosion contact with the concrete plane; b) cross-section of the sample; c) cutting grid and numbering of samples from the slice



Fot. 4. Próbkę z naniesioną siatką cięcia umieszczoną w przecinarkę tarczową

Photo 4. A sample with a mesh placed into a circular saw

brano próbkę referencyjną w celu porównania zawartości żelaza w betonie, w porównaniu z obszarami przylegającymi do skorodowanego pręta.

Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonej analizy składu pierwiastkowego i chemicznego z wykorzystaniem spektrometru określono zawartość procentową poszczególnych pierwiastków w badanej próbce betonowej pochodzącej z żelbetowego słupa energetycznego w zakresie działania spektrometru XRF. Uśredniony skład chemiczny wszystkich plastrów przedstawiono w tabeli 1, natomiast uśredniony skład pierwiastkowy w tabeli 2.

Na podstawie analizy składu pierwiastkowego badanych próbek (tabela 2) wykazano, że zawierają one w dominującej ilości krzem (Si) na poziomie

Tabela 1. Skład chemiczny poszczególnych części plastrów
Table 1. The chemical composition of the part of the plaster

Skład chemiczny	Średnia zawartość [%]						próbka referencyjna
	część 1	część 2	część 3	część 4	część 5	część 6	
SiO ₂	65,25	68,39	69,61	67,90	65,85	69,12	68,67
CaO	11,38	11,85	11,59	12,28	12,43	12,08	12,47
Fe ₂ O ₃	7,61	3,65	3,13	1,70	1,65	1,62	1,62
Al ₂ O ₃	3,63	4,23	3,53	3,31	4,00	4,59	4,40
SO ₃	1,39	1,43	1,16	1,21	1,16	0,96	1,09
MgO	0,92	1,14	0,84	0,94	1,04	0,94	1,05
K ₂ O	0,43	0,52	0,39	0,46	0,50	0,58	0,52
Na ₂ O	0,70	0,57	0,51	0,43	0,54	0,57	0,53
Inne	8,69	8,23	9,22	11,77	12,83	9,54	9,65

Tabela 2. Skład pierwiastkowy plastrów
Table 2. Chemical composition of plasters

Pierwiastek	Średnia zawartość [%]						próbka referencyjna
	część 1	część 2	część 3	część 4	część 5	część 6	
Si	30,50	31,97	32,54	31,74	30,78	32,31	32,10
Ca	8,14	8,47	8,29	8,78	8,89	8,64	8,92
Fe	5,32	2,55	2,19	1,19	1,15	1,13	1,13
Al	1,92	2,24	1,87	1,75	2,12	2,43	2,33
S	0,56	0,58	0,47	0,49	0,47	0,39	0,44
Mg	0,56	0,69	0,51	0,57	0,63	0,57	0,64
K	0,35	0,42	0,32	0,37	0,41	0,47	0,42
Ti	0,06	0,07	0,05	0,06	0,07	0,09	0,06
Na	0,52	0,42	0,38	0,32	0,40	0,42	0,39

od 32,54% w części 3 do 30,50% w części 1, przy wartości uzyskanej z próbki referencyjnej 30,10%. Drugim istotnym składnikiem jest wapń (Ca) na poziomie od 8,89% w części 5 do 8,14% w części 1, przy wartości uzyskanej z próbki referencyjnej 8,92%. Trzecim składnikiem jest glin (Al) na poziomie od 2,43% w części 6 do 1,75% w części 4, przy wartości uzyskanej z próbki referencyjnej 2,33%. W tym zestawieniu interesujące nas żelazo (Fe) jest na poziomie od 5,32% w części 1 do 1,13% w części 6, przy wartości uzyskanej z próbki referencyjnej 1,13%.

Na podstawie wyników stwierdzono, że najbardziej zróżnicowany jest poziom żelaza w stosunku do próbki referencyjnej. Jednoznacznie wskazuje to na udział żelaza pochodzącego z korozji pręta zbrojeniowego. Podobne wnioski wyciągnięto z analizy składu chemicznego badanych plastrów (tabela 1). Zawartość tlenku żelaza Fe₂O₃ waha się od 7,61% w części 1 do 1,62% w części 6, przy wartości na poziomie 1,62% uzyskanej w przypadku próbki referencyjnej. Jednoznacznie wskazuje to

na udział w badaniu tlenku żelaza pochodzącego z korozji pręta zbrojeniowego.

W tabeli 1, zawierającej skład chemiczny, w ostatnim wierszu przedstawiono pierwiastki o koncentracji poniżej 0,5% oraz te, których spektrometr XRF nie był w stanie wykryć ze względu na charakterystykę urządzenia, przypisując im oznaczenie „inne”. Mieszczą się one w przedziale od 12,83% w części 5 do 8,23% w części 2. Należy pod-

kreślić, że do oceny zawartości żelaza w betonie zakres badania spektrometru XRF jest wystarczający.

Analiza zawartości żelaza w plastrach wykazała, że penetracja rdzy w betonie maleje wraz ze wzrostem odległości od pręta zbrojeniowego (tabela 3). Pobrana ze środka badanego słupa żelbetowego próbka referencyjna pozwala na ocenę migracji korozji w zależności od położenia wyodrębnionych części od 1 do 6 (zgodnie z fotografią 3c) plastrów od 1 do 8 (fotografia 2). Zawartość żelaza w próbce referencyjnej wynika z występowania żelaza w cemencie oraz kruszywie, natomiast nie wynika z penetracji rdzy zbrojenia w betonie.

Na podstawie badań stwierdzono, że w przypadku próbki betonowej pochodzącej z żelbetowego słupa energetycznego części z warstw przy otulinie korodującego zbrojenia zawierają średnio 5,32% żelaza (zgodnie z fotografią 3c). Wartości ekstremalne żelaza w plastrach 1 – 8 mieszczą się w przedziale od 9,8% w plastrze 1 do 3,49% w plastrze 3. W częściach 2 i 3 średnia zawartość żelaza wynosi odpowiednio 2,55% i 2,19%. Mieszczą się one w przedziale od 2,93% w plastrze 4 do 1,8% w plastrze 2. W częściach 4, 5 i 6 wszystkich plastrów badanej próbki betonowej, średnia zawartość żelaza jest porównywalna z próbką referencyjną wynoszącą 1,13%. Wartości te w rozpatrywanych częściach wszystkich plastrów próbki wynoszą 1,35 – 0,84%.

Na podstawie przeprowadzonej analizy zawartości żelaza w poszczególnych częściach plastrów (fotografia 3c) prób-

Tabela 3. Zawartość żelaza w poszczególnych częściach plastrów próbek betonowych od 1 do 8
Table 3. Iron content in individual parts of plasters of concrete samples parts from 1 to 8

Nr plastra	Zawartość żelaza [%]						próbka referencyjna
	część 1	część 2	część 3	część 4	część 5	część 6	
1	9,80	2,50	2,29	1,28	1,25	1,24	1,15
2	3,67	2,57	1,80	1,02	0,95	0,89	1,12
3	3,49	1,93	1,88	0,86	0,84	0,85	1,10
4	6,70	2,93	2,35	1,31	1,26	1,25	1,16
5	4,02	2,48	2,27	1,24	1,24	1,15	1,12
6	3,69	2,82	2,41	1,35	1,26	1,25	1,15
7	5,80	2,62	2,32	1,28	1,27	1,26	1,10
8	5,42	2,54	2,16	1,15	1,13	1,12	1,14
Średnia	5,32	2,55	2,19	1,19	1,15	1,13	1,13

ki betonowej stwierdzono, że w przypadku występowania korozji pręta zbrojeniowego zmienia się ilość żelaza w betonie w zależności od odległości badanej próbki od korodującego pręta zbrojeniowego. Na tej podstawie można oceniać stopień korozji pręta zbrojeniowego, nawet jeśli jeszcze nie ma widocznych pęknięć otuliny betonowej. W tym celu należy pobrać próbki z punktowego odwiertu, a następnie przeprowadzić badanie spektrometrem pod kątem zawartości żelaza.

Pomiar odczynu pH betonu w plastrach wykonano za pomocą elektronicznego miernika, kalibrując urządzenie przed rozpoczęciem badań. W wyniku przeprowadzonego badania otrzymano odczyn pH każdej części plastra (tabela 4). Wartości te pozwalają wska-

Tabela 4. Odczyn pH w poszczególnych częściach plastrów próbek betonowych od 1 do 8
Table 4. pH in individual parts of concrete sample plasters from 1 to 8

Nr plastra	Odczyn pH							próbka referencyjna
	część 1	część 2	część 3	część 4	część 5	część 6		
1	9,9	11,1	10,9	11,9	12,0	12,0	12,3	
2	10,9	11,6	11,8	12,1	11,9	11,9	12,1	
3	10,7	11,8	11,8	12,0	12,1	12,0	12,1	
4	10,2	11,3	11,5	12,3	12,3	12,3	12,0	
5	11,1	11,7	12,0	12,1	12,1	12,1	11,9	
6	11,4	11,5	12,1	12,2	11,9	11,8	12,3	
7	10,8	11,9	11,9	12,0	12,2	12,2	12,3	
8	11,3	12,0	11,8	11,9	12,0	12,1	12,1	
Średnia	10,8	11,6	11,7	12,1	12,1	12,1	12,1	

zać, że w przypadku badanych próbek przy otulinie korodującego zbrojenia odczyn pH wynosi średnio 10,8 (patrz część 1, zgodnie z fotografią 3c), w częściach 2 oraz 3 odczyn pH waha się średnio w okolicach 11,6 – 11,7, natomiast w dalej odsuniętych częściach od 4 do 6 oraz w próbkach referencyjnych wynosi średnio 12,1.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że obniżony odczyn pH betonu występuje w pobliżu skorodowanego zbrojenia, natomiast w zewnętrznych częściach poziom pH wskazuje na niską karbonatyzację betonu. Można zatem stwierdzić, iż karbonatyzacja betonu nie była przyczyną korozji zbrojenia w badanym słupie, a samo badanie karbonatyzacji betonu nie wykazało obniżonej ochrony stali przed korozją.

Podsumowanie

Oddziaływanie środowiska na konstrukcje żelbetowe ma duży wpływ na ich trwałość i bezpieczeństwo podczas eksploatacji. W wielu przypadkach skutki korozji zbrojenia wpływają destrukcyjnie na konstrukcję, a gdy widoczne są już jej symptomy, zwykle naprawa nie jest możliwa. Jeśli jesteśmy w stanie ocenić stan konstrukcji żelbetowej, zanim pojawią się widoczne uszkodzenia, to w odpowiednim momencie można zapobiec trwałym jej uszkodzeniom i wyeliminować szkody wyrządzone przez korozję zbrojenia.

Badając skład pierwiastkowy i chemiczny betonu w pobliżu zbrojenia, można określić stopień korozji w zależności od zawartości żelaza. Zwiększona zawartość żelaza oraz jego tlenków

w betonie może występować w sytuacji, w której:

- pręt zbrojeniowy ulega korozji, ale jeszcze nie doszło do jego odsłonięcia lub pęknięć otuliny;
- naprawa została przeprowadzona w sposób niewłaściwy, korozyjność pręta nie została wyeliminowana i jest ona dalej źródłem powodującym korozję betonu i w dalszym etapie prowadzić może do złuszczenia się wykonanej z betonu otuliny, przez co dojdzie do odsłonięcia zbrojenia.

Odpowiednio wczesne wykrycie procesu korozji stali zbrojeniowej oraz jej przyczyn, pozwala wykorzystać właściwe techniki zapobiegające dalszej korozji oraz ewentualne zaplanowanie remontu konstrukcji w momencie, gdy jeszcze nie uległa całkowitej destrukcji i nie ma konieczności jej demontażu.

Literatura

- [1] Owsiak Z. Korozja wewnętrzna betonu. Monografie, Studia, Rozprawy nr M66, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej. Kielce; 2015.
- [2] PN-EN 206+A1:2021-08: Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [3] Ajdukiewicz A. Konstrukcje betonowe projektowane na okres użytkowania – badania a nowe ujęcie normatywne. Problemy naukowo-badawcze budownictwa, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Białystok; 2007.
- [4] Czarnecki L, Emmons PH. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków; 2003.
- [5] Grzmil W, Raczkiewicz W. Ocena wpływu rodzaju cementu na proces karbonatyzacji betonu i korozji zbrojenia w próbkach żelbetowych. Cement, Wapno, Beton. 2017; R-22/84 4: 311 – 319.
- [6] Stryżewska T, Kańska S. Woda jako główny czynnik procesów degradacji cegły ceramicznej. Materiały Budowlane. 2022; <https://doi.org/10.15199/33.2022.09.10>.
- [7] Ściślewski Z. Ochrona konstrukcji żelbetowych, Warszawa. Arkady 1999.
- [8] Ajdukiewicz A. Beton a środowisko – zasady projektowania konstrukcji betonowych z uwagi na trwałość i wpływ na środowisko. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Awaria budowlane 2011, Międzyzdroje; 2011.
- [9] Bijen J. Durability of engineering structures. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge; 2003.
- [10] Zybura A, Jaśniok M, Jaśniok T. O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetowych. Inżynieria i Budownictwo. 2010; 66 (10): 519 – 525.
- [11] Wieczorek G. Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki i karbonatyzację otuliny. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław; 2002.
- [12] Bajorek G, Drabczyk M, Nowicka-Semen J. Znaczenie cementów niskolinkierowych w kształtowaniu trwałości elementów żelbetowych. Materiały Budowlane. 2022; <https://doi.org/10.15199/33.2022.09.07>.
- [13] PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2021-08.
- [14] François R, Laurens S, Deby F. 1 – Steel Corrosion in Reinforced Concrete. Corrosion and its Consequences for Reinforced Concrete Structures. 2018; <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-234-2.50001-9>.
- [15] Peng L, Zeng W, Zhao Y, Li L, Poon C, Zheng H. Steel corrosion and corrosion-induced cracking in reinforced concrete with carbonated recycled aggregate. Cement and Concrete Composites. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104694>.
- [16] Yuvaraj S, Nirmalkumar K, Rajesh Kumar V., Gayathri R, Mukilan K, Shubikksha S. Influence of corrosion inhibitors in reinforced concrete – A state of art of review. Materials Today: Proceedings. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.118>.
- [17] <https://intako.pl/Zapobieganie-zjawisku-korozji-w-zelbecie-blog-pol-1598432667.html> [Data dostępu 12.10.2022 r.]

Przyjęto do druku: 20.10.2022 r.