

Karbonatyzacja betonu otuliny zbrojenia jako przyczyna utraty trwałości konstrukcji

KAJA KŁOS^{1,*}, GRZEGORZ ADAMCZEWSKI^{2,*}, PIOTR WOYCIECHOWSKI², PAWEŁ ŁUKOWSKI²

¹TPA Sp. z o.o.

²Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

Streszczenie: Zjawisko karbonatyzacji betonu związane jest z procesami fizyko-chemicznymi zachodzącymi w betonie pod wpływem dwutlenku węgla. Karbonatyzacja betonu otuliny zbrojenia jest jedną z głównych przyczyn zmniejszenia trwałości konstrukcji żelbetowych. W artykule omówiono mechanizmy fizyko-chemiczne dotyczące samego zjawiska karbonatyzacji, jak również zwrócono uwagę na synergiczny efekt destrukcji mrozowej i karbonatyzacji betonu dla elementu żelbetowego. Przedstawiono przykłady uszkodzeń konstrukcji pochodzące z praktyki inżynierskiej w zakresie diagnostyki konstrukcji żelbetowych.

Słowa kluczowe: karbonatyzacja betonu, mrozoodporność betonu, korozja betonu, trwałość betonu, otulina zbrojenia, synergiczny efekt destrukcji mrozowej i karbonatyzacji betonu.

1. Trwałość betonu

Wg PN-EN 1990 „konstrukcje należy w taki sposób projektować, aby zmiany następujące w projektowym okresie użytkowania, z uwzględnieniem wpływów środowiska i przewidywanego poziomu utrzymania, nie obniżały właściwości użytkowych konstrukcji poniżej zamierzonego poziomu” [1]. Trwałość należy zatem rozumieć jako okres utrzymania poziomu właściwości użytkowych konstrukcji powyżej krytycznej wartości w określonym czasie jej eksploatacji.

Według PN-EN 1990:2004 „konstrukcję należy zaprojektować i wykonać w taki sposób, aby w zamierzonym okresie użytkowania, z należytym poziomem niezawodności i bez nadmiernych kosztów przejmowała wszystkie wpływy i oddziaływania, których pojawienia się można oczekiwać podczas wykonywania i użytkowania, pozostała przydatna do przewidywanego użytkowania, konstrukcję należy zaprojektować tak, aby jej nośność, użyteczność i trwałość była należąca” [1].

W związku z tym Eurokod [1] wymaga od konstrukcji spełnienia w zamierzonym okresie eksploatacji trzech fundamentalnych wymagań: przejmowania wpływów i oddziaływań, przydatności do użytkowania i należytej trwałości.

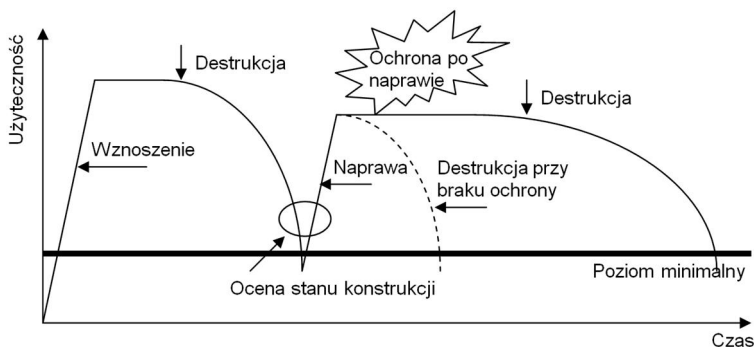
Proces korozji jest zjawiskiem postępującym w czasie i nie jest to postęp liniowy. W okresie inicjacji zwykle objawy są trudno zauważalne, ponieważ rozwijają się lokalnie w mikrostrukturze. Podczas badań laboratoryjnych często można zauważyć początkowe wzmocnienie betonu z uwagi na wypełnienie porów produktami korozji. Dopiero w etapie późniejszym przekroczenie naprężeń granicznych wynikających z dalszego wzrostu produktów korozji

*Autor do korespondencji: kaja.klos@tpaqi.com; g.adamczewski@II.Pw.Edu.Pl

w porach powoduje powstanie rys, spękań i lokalnych odspojen. Dalszy przebieg korozji zazwyczaj jest już szybszy (rys. 1). Wobec powyższych uwarunkowań im wcześniej przystąpi się do naprawy tym mniejszy może być jej zakres i większa efektywność. Ponadto podstawą skutecznej naprawy jest prawidłowa identyfikacja przyczyny i dobór środków zaradczych adekwatny do zidentyfikowanego mechanizmu korozji. Przeprowadzanie naprawy „po omacku” w oparciu o identyfikację jedynie objawów, a nie przyczyn ogranicza w znacznym stopniu skuteczność naprawy. W skrajnych przypadkach zaniedbania na etapie diagnostycznym mogą powodować szybkie pogorszenie stanu konstrukcji np. z uwagi na zamknięcie środowiska korozyjnego pod warstwą naprawczą. W naprawach konstrukcji betonowych obowiązuje taka sama zasada jak w medycynie: leczyć przyczyny a nie objawy. Narzędzia prawidłowego postępowania w przypadku zapewnienia ochrony betonu, zawarte są w normach rodziny PN-EN 1504 [2]. Koniecznym etapem jest przeprowadzenie kompleksowych badań diagnostycznych.

W kształtowaniu trwałości betonu kluczowy jest zawsze etap projektowy. Determinuje on dobór materiałów, geometrię elementów oraz metody ochrony powierzchniowej.

Ustalanie klasy konstrukcji wg EC0, EC1 i EC2 z uwzględnieniem specyficznych wymagań dla klas ekspozycji betonu związanych z karbonatyzacją (XC), pozwala na dobór minimalnej otuliny z betonu o określonej klasie wytrzymałości zapewniającej wymaganą trwałość elementu [1, 3, 14]. Celem artykułu jest zwrócenie uwagi na ryzyka związane z synergicznymi efektami oddziaływania środowiska pomimo przyjęcia prawidłowych rozwiązań w świetle aktualnej wiedzy technicznej.



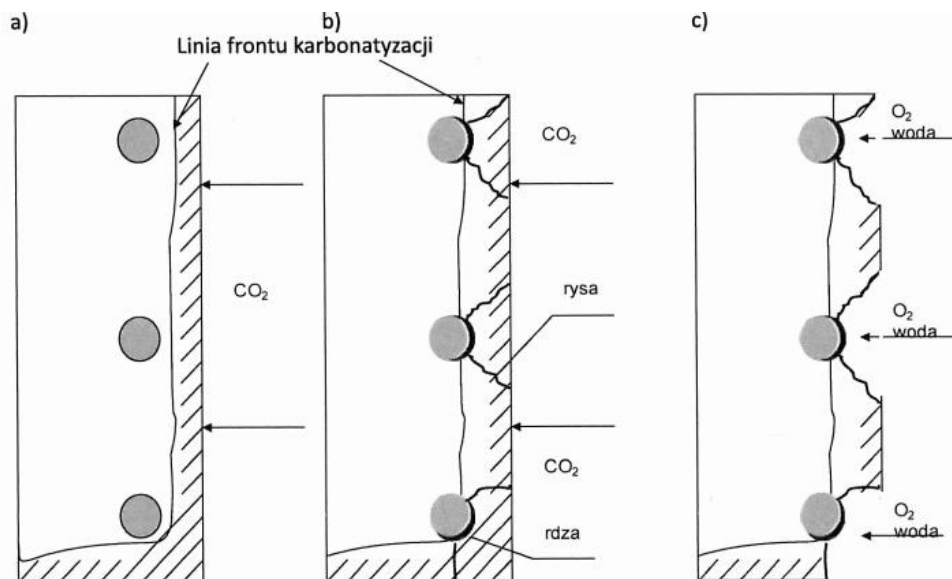
Rys. 1. Użyteczność obiektu w czasie [4].

2. Zjawisko karbonatyzacji

Karbonatyzacja jest zespołem przemian fizykochemicznych betonu pod wpływem długotrwałego oddziaływania na powierzchnię betonu dwutlenku węgla, który jest stale obecny w otaczającym nas powietrzu atmosferycznym oraz w atmosferze wewnątrz obiektów budowlanych. Stężenie CO_2 waha się w przedziale 0,03 a 0,3% w zależności od miejsca występowania konstrukcji betonowej [5].

Zbrojenie stalowe umiejscowione w betonie jest chronione przed korozją, oczywiście gdy beton nie jest skażony substancjami agresywnymi, a jego pH jest na tyle wysokie, aby zapewnić trwałość warstewki pasywnej na powierzchni zbrojenia. Korozja zbrojenia, zapoczątkowana przez proces karbonatyzacji otuliny, stopniowo prowadzi do jej destrukcji. Pierwszy etap karbonatyzacji (rys. 2a) nie ma znaczących skutków negatywnych dla konstrukcji. W momencie obniżenia pH w otoczeniu zbrojenia do około 11 pH następuje utrata stanu pasywacji i zapoczątkowanie korozji elektrochemicznej zbrojenia. Pojawienie się rys w otulinie, przez które z łatwością mogą przenikać agresywne substancje, potęguje

karbonatyzację (rys. 2b). W trzecim etapie (rys. 2c) następuje stopniowe odspajanie i odpryski otuliny, przez co zbrojenie jest odsłonięte i prowadzi to do istotnego obniżenia trwałości konstrukcji betonowej [5].



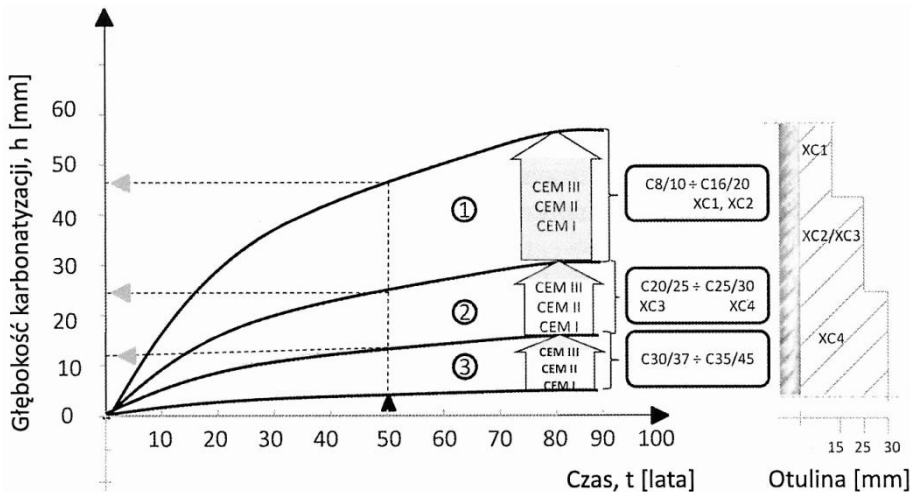
Rys. 2. Etapy niszczenia konstrukcji żelbetowej w wyniku karbonatyzacji [5].

Karbonatyzacja istotnie wpływa na obniżenie trwałości zbrojenia w konstrukcji żelbetowej głównie powoduje zmniejszenie pH betonu, jednak w odniesieniu do betonu obserwuje się efekty pozytywne. W strefie skarbonatyzowanej dochodzi do zmniejszenia ilości i wielkości porów, tym samym powoduje to doszczelnienie mikrostruktury betonu. Dodatkowo obserwuje się zwiększoną twardość powierzchniową oraz wytrzymałość warstwy przypowierzchniowej betonu skarbonatyzowanego [5, 6, 7].

Na intensywność i tempo karbonatyzacji ma wpływ wiele czynników o charakterze zewnętrznym, jak i wewnętrznym. Decydujący jest m. in. rodzaj betonu, ilość spoiwa, współczynnik w/c, sposób zagęszczania betonu, pielęgnacja, warunki klimatyczne i środowiskowe, w których znajduje się późniejsza konstrukcja betonowa. Jeżeli chodzi o czynniki zewnętrzne to do najważniejszych można zaliczyć stężenie CO₂, wilgotność i temperaturę powietrza. Spośród najistotniejszych czynników wewnętrznych decyduje przede wszystkim szczelność betonu, pośrednio zależna od współczynnika w/c, a także rodzaj i ilość spoiwa [8].

Otulina betonowa chroni zbrojenie stalowe przed korozją, zapewnia odporność ogniową oraz współpracę zbrojenia z betonem, oczywiście pod warunkiem poprawnie zaprojektowanej i wykonanej konstrukcji.

Nomogram przedstawiony poniżej (rys. 3) sugeruje nam jaka może być głębokość karbonatyzacji, z uwagi na zastosowany rodzaj cementu, klasę wytrzymałości oraz dobór minimalnej grubości otuliny przy klasie ekspozycji konstrukcji z grupy XC. Przy doborze otuliny, warto odnieść się do wytycznych zawartych w Eurokodzie 2 – PN-EN 1992-1-1 [3], gdzie najczęściej wybierana klasa konstrukcji S4 odnosi się do projektowanego okresu użytkowania konstrukcji 50 lat (tab. 1). Klasę konstrukcji można również wyznaczyć na podstawie projektowanej klasy wytrzymałości, projektowanego okresu użytkowania 100 lat, kształtu konstrukcji oraz przy specjalnej kontroli jakości betonu.



Rys. 3. Wymagana grubość otuliny ze względu na orientacyjny zasięg karbonatyzacji wynikający z klasy wytrzymałości betonu i rodzaju cementu [5, 6].

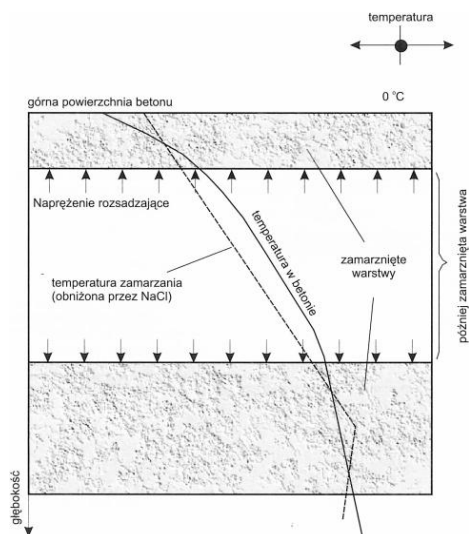
Tablica 1. Minimalne otulenie wymagane ze względu na trwałość stali zbrojeniowej [3]

Klasa konstrukcji	Wymagania ze względu na środowisko						
	Klasa ekspozycji						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	55	55

3. Synergiczny efekt oddziaływań korozyjnych

Warunki środowiskowe i klimatyczne mają istotny wpływ na stan i trwałość niezabezpieczonych przed czynnikami zewnętrznymi elementów żelbetowych. Najczęstszą przyczyną uszkodzeń konstrukcji betonowej jest brak odporności mrozowej. Karbonatyzacja betonu prowadzi do pozbawienia betonu właściwości ochronnych otuliny względem stali zbrojeniowej (CO_2 penetruje beton i reaguje z rozpuszczonymi w wodzie składnikami stwardniałego zaczynu cementowego). Jednoczesne nałożenie się na siebie tych dwóch zjawisk (synergiczny efekt, który nie jest uwzględniany w tradycyjnym podejściu projektowym) może prowadzić do znacznego obniżenia trwałości konstrukcji z betonu.

Korozja mrozowa w klimacie umiarkowanym, gdzie beton poddawany jest cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu, w dużej mierze dodatkowo w obecności soli odładzających, jest bardzo częstym zjawiskiem. Do korozji mrozowej dochodzi poprzez zwiększenie objętości wody podczas jej zamrażania oraz przy współdziałających dużych naprężeniach – na betonie zauważalne są spękania i rysy. W momencie gdy krzywe temperatury zamrażania oraz temperatury w betonie przetną się we wnętrzu płyty betonowej, do zamrażania wody dojdzie przy górnej powierzchni betonu oraz w głębi obiektu (rys. 4). Gdy temperatura zewnętrzna będzie się obniżać, pozostała część wody zamroznie a skutkiem tego będzie uszkodzenie (rozsadzenie) górnej powierzchni betonu [4].



Rys. 4. Mechanizm korozji mrozowej płyty betonowej w obecności soli odładzających [4].

Warto wspomnieć o synergii oddziaływań przyczyniających się do pogorszenia trwałości konstrukcji. Środowisko, w którym „żyje” beton to atmosfera, woda i gleba. Panujący w Polsce klimat umiarkowany ciepły przejściowy cechuje duża zmienność pogody. Zimy mogą być mroźne, jak i łagodne, a lata upalne bądź deszczowe. W Polsce przez ponad 9 miesięcy w roku wilgotność względna powietrza jest wyższa niż 75%, obserwowane jest dość wysokie, ale utrzymujące się na stałym poziomie zanieczyszczenie w postaci emisji CO₂.

Obserwuje się wiele uszkodzonych konstrukcji, w których widoczny jest synergiczny efekt oddziaływań korozyjnych. W artykule zostały przywołane przykłady pochodzące z praktyki inżynierskiej, w której pokazana została destrukcja otuliny zbrojenia.

4. Prefabrykowane elementy elewacji obiektu sakralnego

W przedstawionym przykładzie omówiono elewację frontową ponad 60-letniego Kościoła Św. Michała Archaniola w Warszawie. Analiza tego przypadku stanowiła ciekawe studium trwałości filigranowych profili betonowych wyeksponowanych na reprezentacyjnej elewacji, w trudnych warunkach środowiskowych centrum Warszawy. Zaawansowane uszkodzenia betonu prefabrykatów wystąpiły głównie na frontowych elementach elewacyjnych kościoła [9].

Przeprowadzone badania, pomiary i obserwacje pozwoliły stwierdzić rozległe uszkodzenia elementów elewacyjnych (rys. 5a). Obejmowały one odspojenia zewnętrznych pionowych krawędzi elementów oraz spękania poziome elementów od strony wewnętrznej. Spękania wewnątrz przebiegały poziomo mniej więcej w połowie wysokości elementu. Odspojenia od zewnątrz dotyczyły praktycznie wszystkich elementów na całej wysokości fasady. Uszkodzenia elementów od zewnątrz przebiegały wzdłuż prętów zbrojeniowych i dotyczyły całej grubości otuliny zbrojenia. Zbrojenie z prętów o średnicy 6 mm i grubość otuliny poniżej 2 cm w połączeniu z niską jakością betonu (piaskobeton z kruszywem do 2 mm) stanowiły czynniki, które sprzyjały korozji zbrojenia, a w jej następstwie do odpadania fragmentów otuliny. Mechanizm korozji związany jest przede wszystkim ze zjawiskiem karbonatyzacji – w trakcie prac diagnostycznych stwierdzono całkowite skarbonatyzowanie otuliny i daleko posuniętą korozję prętów (rys. 5b). W wyniku wyczerpania trwałości elewacji, zagrożone było

bezpieczeństwo użytkowników, z uwagi na spadanie odspojonych fragmentów oraz, w dalszej perspektywie czasu, na ryzyko utraty stateczności samonośnej ściany elewacyjnej [9].

Do przyczyn uszkodzeń elewacji można zaliczyć błędy wynikające już na etapie projektowania elementów według standardów z przed przeszło pół wieku, a także związane z jakością ówczesnych materiałów i niskimi standardami produkcji w porównaniu do współczesnych wytwórni prefabrykatów. Zastosowany w elementach beton charakteryzował się bardzo drobnym uziarnieniem i prawdopodobnie (po ocenie makroskopowej) dość niską zawartością cementu. Grubość otuliny wynosiła w przypadku powierzchni bocznych elementów nawet jedynie kilkanaście milimetrów, co wynikało z geometrii cienkościennych elementów elewacyjnych (rys. 5c). Zbrojenie elementów wykonano z prętów gładkich $\varnothing 6$ mm, czyli potencjalnie bardzo podatnych na korozję. Wymienione charakterystyki materiałowe byłyby niedopuszczalne w świetle obecnych standardów projektowania prefabrykatów. Przyjęte materiały o niskiej jakości oraz niewielki stopień zbrojenia elementów wpłynął również na ogólną ich sztywność podczas pracy w samonośnej ścianie elewacji – znalazło to odzwierciedlenie w regularnym układzie rys przebiegających poziomo zazwyczaj w połowie wysokości poszczególnych elementów. Analizując trwałość elewacji należy również wziąć pod uwagę zmiany środowiskowe w rejonie kościoła, zlokalizowanego pierwotnie poza ścisłym centrum Warszawy, który w miarę rozwoju stolicy znalazł się w bardziej agresywnej strefie oddziaływania zanieczyszczeń miejskich.



Rys. 5. a) – widok na rozległe uszkodzenia elementów elewacyjnych; b) – przykład wykruszeń elementu; c) – pomiar głębokości karbonatyzacji i otuliny [9].

5. Prefabrykowane elementy infrastrukturalne

Przedstawione w tym miejscu elementy prefabrykowane w postaci słupów należą do grupy średniowymiarowych elementów prętowych infrastruktury energetycznej. Elementy tego rodzaju charakteryzują się niewielkim przekrojem poprzecznym, co powoduje, że możliwości kształtowania ich trwałości poprzez dobór otuliny zbrojenia o zwiększonej grubości są ograniczone. Wobec powyższego znaczenia nabiera jakość zastosowanych materiałów, w tym rodzaj kruszywa, skład betonu (współczynnik w/c) oraz rodzaj zastosowanych domieszek i dodatków.

Warunki eksploatacji elementów w pewnych okolicznościach mogą być dość szczególnie z uwagi na wspomniany wcześniej efekt synergiczny oddziaływań zewnętrznych. W przypadku rozważanych elementów infrastruktury energetycznej w szczególności należy zwrócić uwagę na strefę przyziemia elementów. Oddziaływanie atmosfery zawierającej dwutlenek węgla oraz cyklicznych zmian temperatury obejmuje z oczywistych względów element na całej wysokości.

Jeżeli chodzi o strefę przyziemia, warunki są nieco inne z uwagi na dodatkowe cykle zmiennej wilgotności. Związane są one z występowaniem strefy rozprysku podczas opadów atmosferycznych, obecnością wilgoci w strefie występowania roślinności czy też wydłużonego w czasie odparowania wilgoci z gleby.

Powyższa kumulacja oddziaływań środowiskowych tworzy „optymalne” uwarunkowania korozyjne (maksymalna szybkość karbonatyzacji, największa intensywność szkód mrozowych, zmienna wilgotność atmosferyczna) otuliny betonowej. Rysy pojawiające się na konstrukcji obniżają estetykę elementu oraz sygnalizują powstawanie znaczących procesów niszczenia, a także warunkują stan graniczny użyteczności, czego ekstremalny przykład w końcowym okresie eksploatacji elementu uwidocznił na rys. 6c powyżej. Korozja otuliny postępuje w początkowym okresie dość powoli, jednakże po przekroczeniu pewnego etapu ulega całkowitemu odspojeniu (rys. 6a, 6b), co w przypadku smukłych elementów oznacza bezwzględną konieczność natychmiastowej reakcji – zazwyczaj wymiany elementu.



Rys. 6. a) – widok na uszkodzony słup; b) – rozległe odspojenia otuliny w elemencie; c) – destrukcja elementu.

6. Podsumowanie

Zagadnienie trwałości konstrukcji żelbetowych oraz równoczesne zachowanie bezpieczeństwa w okresie eksploatacji danego obiektu wymaga odpowiedniego rozpatrywania i analizy łączenia zjawisk fizycznych, fizykochemicznych, chemicznych i elektrochemicznych w przewidywanych warunkach pracy betonu. Podane przykłady korozji betonu i zbrojenia elementów wskazują, że synergiczne oddziaływania środowiska mogą intensyfikować destrukcję elementów. Przedstawione rozważania dowodzą, że sposób doboru otuliny zbrojenia z uwagi na zagrożenie karbonatyzacją, jaki narzuca EC2 [3] nie uwzględnia efektu synergicznego, który może decydować o rzeczywistej odporności układu na oddziaływania środowiska. Projektowanie trwałości w oparciu o pojęcia odporności na karbonatyzację, mrozoodporności i wzajemnej

synergii [15] są podstawą projektowanej nowej edycji eurokodów, w których pojawią się nie tylko klasy ekspozycji ale i klasy odporności konstrukcji na te zagrożenia.

Przywołane przykłady obejmują elementy prefabrykowane, które ze względów technicznych posiadały relatywnie niewielką grubość otuliny. Pomimo agresywnego oddziaływania środowiska należy jednak zauważyć, że elementy te wykazały zaskakująco wysoką trwałość, w szczególności zważywszy na okres kiedy były wykonywane. Można to przypisać podnoszonym wielokrotnie [10, 11, 12, 13] cechom charakterystycznym technologii prefabrykacji związanymi z kontrolowanymi warunkami produkcji przemysłowej, powtarzalną technologią produkcji, dokładnością i powtarzalnością montażu.

Literatura

1. PN-EN 1990:2004 Eurokod, Podstawy projektowania konstrukcji.
2. PN-EN 1504 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności.
3. PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
4. Czarnecki L., Emmons P.H.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków 2002.
5. Woyciechowski P.: Model karbonatyzacji betonu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
6. Czarnecki L., Woyciechowski P.: Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space?; PAN; Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences 2015.
7. Kurdowski W.: Chemia cementu i betonu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
8. Praca zbiorowa: Beton, technologie i metody badań; Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2020.
9. Woyciechowski P., Adamczewski G.: Estetyka i trwałość elewacji obiektu sakralnego z prefabrykatów betonowych, Materiały Budowlane, 9/2020
10. Adamczewski G., Woyciechowski P.: Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność, vol. Z.1, 2014, Warszawa, Stowarzyszenie Producentów Betonów, 62 s., ISBN 978-83-941005-6-8.
11. Adamczewski G., Woyciechowski P.: Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność, nr 2 cz. 1. Konstrukcje szkieletowe realizowane z elementów prętowych, 2015, Warszawa, Stowarzyszenie Producentów Betonów, 47 s., ISBN 978-83-941005-2-0.
12. Adamczewski G., Woyciechowski P.: Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność, nr 2 cz.2. Konstrukcje szkieletowe realizowane z elementów prętowych, 2015, Warszawa, Stowarzyszenie Producentów Betonów, 62 s., ISBN 978-83-941005-3-7.
13. Adamczewski G., Woyciechowski P., Oleszek R.: Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność. Z4. Obiekty infrastruktury drogowo-mostowej, 2016, Warszawa, Stowarzyszenie Producentów Betonów, 62 s., ISBN 978-83-941005-6-8.
14. PN-EN 1991-1-1 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje, Część 1-1: Oddziaływania ogólne, ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
15. Korycka-Kowalska J., Woyciechowski P.: Analiza stanu wiedzy o współzależności pomiędzy destrukcją mrozową i karbonatyzacją betonu, Materiały Budowlane, 12/2015.

Carbonation of concrete cover of reinforcement as a cause of loss of durability of structures

Key words: Carbonation of concrete, frost resistance of concrete, corrosion of concrete, durability of concrete, cover of reinforcement, synergistic effect of frost destruction and carbonation of concrete