

popiół lotny głębokość i tempo karbonatyzacji są największe (rys. 4, 6). W zaprawie z białego cementu portlandzkiego o wysokiej klasie wytrzymałości (52,5R) głębokość skarbonatyzowania była najmniejsza (rys. 2, 9).

Podsumowując, autorzy podkreślają, że zarówno w przypadku zapraw napowietrzonych, jak i nienapowietrzonych nie stwierdzono, aby dwutlenek  $TiO_2$  wpływał negatywnie na odporność na karbonatyzację. Zastosowanie cementu białego portlandzkiego klasy 52,5R do betonu napowietrzonego z kruszywem bazaltowym przyniosło bardzo dobry efekt powolnego powierzchniowego łuszczenia przy badaniu odporności mrozowej betonu w roztworze NaCl. Wysoka trwałość mrozowa betonu z cementem portlandzkim białym 52,5R może wynikać z wysokiej klasy wytrzymałości betonu, nieco niższej nasiąkliwości wagowej [7] oraz dużej zawartości krzemianów wapnia w klinkierze cementu białego [8]. Wysoka wytrzymałość sugeruje mniejszą porowatość kapilarną, będącą drogą do transportu wody lub roztworu NaCl, biorących udział w niszczeniu betonu podczas zamrażania i rozmrażania. Na podstawie wyników badań nie stwierdzono istotnego wpływu dwutlenku  $TiO_2$  na szybkość niszczenia mrozowego w roztworze NaCl. Zarówno w przypadku cementów portlandzkiego i portlandzkiego żuźlowego z dodatkiem  $TiO_2$  wpływ tego tlenku ma charakter neutralny.

## 5. Podsumowanie

- Zastosowanie dodatku dwutlenku tytanu do cementów portlandzkiego białego i portlandzkiego żuźlowego

nie wpływa na postęp karbonatyzacji zapraw napowietrzonych i nienapowietrzonych. W przeciwieństwie do napowietrzonych, które istotnie przyspiesza karbonatyzację i zwiększa jej głębokość w zaprawach ze wszystkich badanych cementów.

- Rodzaj zastosowanego cementu ma istotne znaczenie dla odporności zapraw na karbonatyzację. Tempo i głębokość karbonatyzacji zapraw z cementów portlandzkich żuźlowego i popiołowego były znacząco większe niż zapraw z cementów portlandzkich zwykłego i białego.
- Betony z cementami zawierającymi tlenek tytanu nie ulegały szybszemu niszczeniu mrozowemu w roztworze 3% NaCl niż betony z pozostałymi badanymi cementami.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bianchi C. L., Sacchi B., Capelli S., Pirola C., Cerrato G., Morandi S., Capucci V., Environ. Sci. Pollut. R. 25 (21) (2018) 20348–20353
- [2] Feng S., Liu F., Fu X., Peng X., Zhu J., Zeng Q., Song J., Ceramics International, Vol 45 (17) Part B, (2019) 23061–23069
- [3] PN EN 196-1 Metody badania cementu
- [4] Jackiewicz-Rek W., Woyciechowski P., Cement Wapno Beton 5/2011, str. 249–256
- [5] Ley M. T., Chancey R., Juenger M., Folliard K. J., Cement and Concrete Research 39 (2009), str. 417–425
- [6] Wong H. S., Pappas A. M., Zimmerman R. W., Buenfeld N. R., Cement and Concrete Research 41 (2011), str. 1067–1077
- [7] Wawrzeńczyk J., Molendowska A., Kłak A., 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 471 032023 (2019)
- [8] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010
- [9] Wawrzeńczyk J., Molendowska A., Kłak A., The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 11(1)2016, str. 35–42

# Ochrona betonu przed karbonatyzacją w konstrukcjach mostowych

mgr inż. Kaja Kłos, TPA Sp. z o.o., dr inż. Grzegorz Adamczewski,  
prof. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

Według 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, oczywiście przy zachowaniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa [2].

Okres użytkowania konstrukcji betonowej zależy od jej przeznaczenia. Zazwyczaj przewidywany projektowy okres użytkowania konstrukcji wynosi co najmniej 50 lat. Niemniej jednak, konstrukcja betonowa może być projektowana na krótszy (np. 20 lat) lub dłuższy (np. 100 lat) okres użytkowania [3]. W odniesieniu do elementów obiektu inżynierskiego minimalny okres użytkowania, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie [4] może wynosić nawet 200 lat.

W celu określenia trwałości każdej konstrukcji konieczna jest znajomość początkowych właściwości użytkowych poszczególnych jej części i elementów, a w konsekwencji także zastosowanych materiałów oraz przebieg zmian tych właściwości w czasie. Równie niezbędne jest prawidłowe określenie warunków użytkowania konstrukcji i zastosowanych w niej materiałów [5].

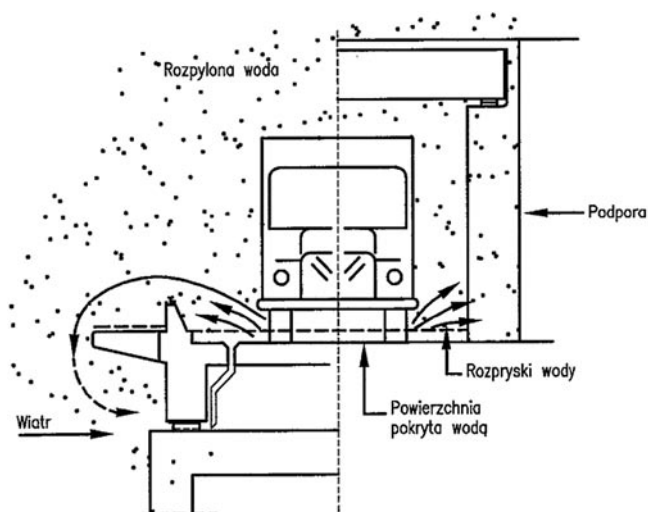
## 2. Trwałość konstrukcji mostowych

Można powiedzieć, że konstrukcje mostowe są eksploatowane w najcięższych warunkach, w których występują wszelkie możliwe negatywne oddziaływania zewnętrzne – zarówno mechaniczne jak i środowiskowe (rys. 1). Na tym samym obiekcie mostowym poszczególne elementy, a nawet części tych samych elementów pracują w różnych warunkach. Analizując oddziaływania środowiskowe, do najbardziej niekorzystnych oddziaływań na konstrukcję zaliczyć można środki odladzające oraz zanieczyszczenia z atmosfery. Wśród czynników równie intensywnie oddziałujących na beton w konstrukcji mostu, można wyróżnić czynniki o charakterze termicznym i chemicznym. Przede wszystkim jest to zmienny gradient temperatury, zmienny gradient wilgotności oraz kontakt powierzchni betonu z mediami gazowymi i cieplnymi [5]. Woda pojawiająca się na obiektach mostowych może być wodą opadową, wodą pochodzącą z topniejącego śniegu czy lodu, wodą rozpyloną (bryza) bądź wodą z rozbryzgu. Woda ta zazwyczaj zawiera rozpuszczone związki chemiczne (różne sole oraz tlenki), które mogą wnikać do wnętrza konstrukcji i negatywnie oddziaływać na strukturę betonu [5, 6].

Oddziaływanie agresywne atmosfery związane jest z obecnością  $\text{CO}_2$ . Podwyższone stężenie dwutlenku węgla w powietrzu prowadzi do karbonatyzacji betonu, zubożenia betonu otuliny i utraty jej zdolności ochronnych wobec stali [5].

## 3. Zjawisko karbonatyzacji

Karbonatyzacja betonu jest zespołem przemian fizykochemicznych pod wpływem długotrwałego oddziaływania na powierzchnię betonu dwutlenku węgla, który jest stale obecny w otaczającym powietrzu atmosferycznym oraz w atmosferze wewnątrz obiektów budowlanych.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zagrożenia korozyjnego elementów mostu [5]

Stężenie  $\text{CO}_2$  waha się w przedziale między 0,03% a 0,3% w zależności od lokalizacji występowania konstrukcji betonowej [7].

Zbrojenie stalowe w betonie chronione jest przed korozją za pomocą warstwy otuliny. Przy doborze otuliny warto odnieść się do wytycznych zawartych w Eurokodzie 2 – PN-EN 1992-1-1 [8], gdzie najczęściej wybierana klasa konstrukcji S4 odnosi się do projektowanego okresu użytkowania konstrukcji 50 lat (tab. 1). Ustalenie klasy konstrukcji może wynikać z uwagi na warunki środowiskowe m.in. korozja spowodowana karbonatyzacją (XC1, XC2, XC3, XC4), sklasyfikowane przez normę PN-EN 206 [3] oraz EC2 [8]. Klasę konstrukcji można również wyznaczyć na podstawie projektowanej klasy wytrzymałości, projektowanego okresu użytkowania 100 lat, kształtu konstrukcji oraz przy specjalnej kontroli jakości betonu.

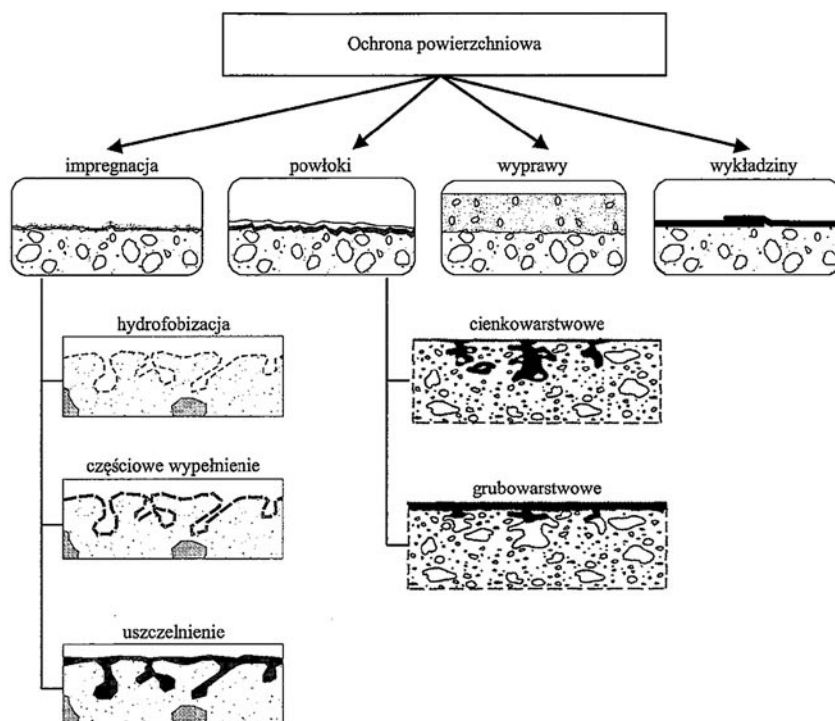
Skuteczna ochrona jest możliwa, gdy beton nie jest skażony substancjami agresywnymi, a jego  $\text{pH}$  jest na tyle wysokie, aby zapewnić trwałość warstewki pasywnej na powierzchni zbrojenia. Korozja zbrojenia jest zjawiskiem kilkietapowym, zapoczątkowanym przez proces karbonatyzacji otuliny i stopniowo prowadzi do jej destrukcji [2].

Pierwszy etap karbonatyzacji nie ma znaczących skutków negatywnych dla konstrukcji. W momencie obniżenia  $\text{pH}$  w otoczeniu zbrojenia do około 11,8, następuje utrata stanu

Tabela 1. Minimalne otulenie (w mm) wymagane ze względu na trwałość stali zbrojeniowej [8]

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

**Rys. 2.** Sposoby ochrony powierzchniowej wg PN-EN 1504-2 [11, 12]



pasywacji i zapoczątkowanie korozji elektrochemicznej zbrojenia. Pojawienie się rys w otulinie, przez które z łatwością mogą przenikać agresywne substancje, przyspiesza postęp karbonatyzacji. W trzecim etapie następuje stopniowe odspajanie i odpryski otuliny, przez co zbrojenie jest odsłonięte i prowadzi to do istotnego obniżenia trwałości konstrukcji betonowej [2, 7].

Na intensywność i tempo karbonatyzacji ma wpływ wiele czynników o charakterze zewnętrznym, jak i wewnętrznym. Decydujący jest m. in. rodzaj cementu, zawartość spoiwa, wartość współczynnika  $w/c$ , sposób zagęszczania betonu, warunki pielęgnacji, warunki klimatyczne i środowiskowe, w których znajduje się dana konstrukcja betonowa. Jeżeli chodzi o czynniki zewnętrzne to do najważniejszych można zaliczyć stężenie  $CO_2$ , wilgotność i temperaturę powietrza. Spośród czynników wewnętrznych najistotniejsze są: szczelność betonu, pośrednio zależna od współczynnika  $w/c$ , a także rodzaj i ilość spoiwa [2].

#### 4. Sposoby ochrony betonu

Skuteczna ochrona konstrukcji mostowych przed degradacją zależy w znacznym stopniu od przyjęcia prawidłowych założeń projektowych. Potrzebne są ustalenia dotyczące: wymaganego okresu użytkowania konstrukcji, analizy oddziaływań środowiskowych, kształtu elementów i szczegółów rozwiązań konstrukcyjnych, przewidywanej jakości wykonawstwa, specjalnych środków zabezpieczających oraz przewidywanych warunków utrzymania konstrukcji w zamierzonym okresie użytkowania [9]. Trzeba zawsze pamiętać o tym, że bardziej racjonalne jest zapobieganie i chronienie (utrzymanie obiektu) niż naprawa.

W celu przeciwdziałania niszczeniu konstrukcji budowlanych w wyniku korozji, stosuje się:

- ochronę konstrukcyjną przez odpowiednie ukształtowanie konstrukcji, zmniejszające agresywne oddziaływanie środowiska;
- ochronę materiałowo-strukturalną, czyli zwiększenie odporności materiału na działanie agresywnych środowisk przez odpowiedni dobór składu i struktury materiałów;
- ochronę powierzchniową, czyli zwiększenie odporności konstrukcji przez ograniczenie (środowisko średnio agresywne) lub odcięcie (środowisko silnie agresywne) dostępu środowiska agresywnego.

W budownictwie mostowym w agresywnym chemicznie środowisku w szczególności stosowana i wymagana jest

ochrona materiałowo-strukturalna. Oznacza ona zwiększenie odporności konstrukcji przez odpowiedni dobór składu materiałowego i ukształtowanie właściwej mikrostruktury podczas jej wykonywania. Ochrona ta związana jest z doborem składu betonu (głównie w aspekcie szczelności), rodzaju zastosowanego cementu i kruszywa, dodatków uplastyczniających i uszczelniających, proporcji składników i technologii wykonania betonu [9].

W przypadku środowiska o średniej agresywności, dodatkowo stosuje się ochronę powierzchniową (rys. 2), która ogranicza dostęp czynników agresywnych w odniesieniu do konstrukcji. W przypadku środowiska silnie agresywnego, powinno się zastosować ochronę powierzchniową odcinającą dostęp czynników agresywnych [10]. Środki ochronne powierzchniowe należy stosować wówczas, gdy metody ochrony materiałowo-strukturalne nie zapewniają wymaganej trwałości [9]. Dodatkowo warto mieć na uwadze to, że w ostatnich latach ogromną popularność zyskała ochrona powierzchniowa, która jest wykorzystywana na większości nowo wybudowanych obiektów mostowych.

#### 5. Ochrona betonu przed karbonatyzacją

W głównej mierze wystarczająca jest ochrona materiałowa, gdzie kluczowym elementem jest odpowiednio skomponowana recepta betonowa i uwzględnienie wszelkich negatywnych oddziaływań na konstrukcję (klasy ekspozycji). Otulina o odpowiedniej grubości z betonu o małej przepuszczalności jest niezbędna do ochrony zbrojenia przed korozją. Dodatkowo można zabezpieczyć beton powierzchniowo – stosując impregnację lub za pomocą powłok [10].

Istnieje możliwość cofnięcia frontu karbonatyzacji pod wpływem migracji jonów OH<sup>-</sup> z głębi betonu, poprzez alkalizację lub realkalizację w procesie naprawczym betonu. Wystąpienie rys na powierzchni betonu jest najszybszą drogą wnikania czynników agresywnych, które powodują względnie szybki postęp karbonatyzacji. Ważne jest, aby rysy odpowiednio wcześniej uszczelnić [10].

## 6. Podejście do ochrony betonu od strony dokumentów technicznych

W przypadku zapisów w WWiORB M-13.01.00 v03 „Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich”, zwrócona jest uwaga na oddziaływanie środowiska (chemiczne i fizyczne). W odniesieniu do konstrukcji mostowych są to oddziaływania, które w projekcie konstrukcyjnym nie zostały uwzględnione jako obciążenia, a wpływają na beton lub na zbrojenie bądź inne znajdujące się w nim elementy metalowe [13]. Są to przykładowo cykle zamrażania i rozmrażania, karbonatyzacja i agresja chemiczna. Dodatkowo zapisy ww. specyfikacji uwzględniają odpowiednio wyselekcjonowane składniki mieszanki betonowej. W rozdziale dotyczącym wyglądu powierzchni betonowych obowiązują wymagania jak dla betonu architektonicznego kategorii co najmniej BA2. Specyfikacja nie zawiera szczególnych wymagań dotyczących ochrony betonu w celu zminimalizowania wystąpienia zjawiska karbonatyzacji.

Mimo to analizując typowe specyfikacje, można zauważyć, że stosowane są dość powszechnie systemy ochrony powierzchniowej, które ograniczają postęp karbonatyzacji betonu. System ochrony powierzchniowej powinien być dobrany na podstawie oceny rzeczywistych lub potencjalnych oddziaływań oraz uwzględnienia zasad i metod ochrony a także napraw [12]. W aktualnych specyfikacjach często można znaleźć odwołanie do normy PN-EN 1504-2 [12], która wskazuje dobór odpowiednich wyrobów i systemów ochrony betonu.

Analizując przykładowe specyfikacje techniczne dotyczące obiektów mostowych, zauważono odniesienia do ochrony powierzchni betonu. Przede wszystkim podkreślona jest ważność stosowania powłok ochronnych, które charakteryzują się wysoką elastycznością. Charakteryzują się one utworzeniem ciągłej warstwy ochronnej, dzięki czemu powierzchnia betonu odporna jest na pęknięcia (mostkowanie rys). Część powłok ochronnych doskonale hamuje postęp karbonatyzacji (wykazujące opór dyfuzji CO<sub>2</sub>), chroni beton przed wnikaniem roztworów chlorków, siarczanów czy azotanów. Dodatkowo powłoki ochronne redukują osiadanie brudu i zanieczyszczeń na powierzchni konstrukcji.

Do kolejnej grupy stosowanych metod ochrony betonu i wymienianych w specyfikacjach zaliczyć można hydrofobizację powierzchni. Proces ten polega na nasyceniu powierzchniowych warstw stwardniałego betonu substancjami

chemicznymi, powodującymi brak zwilżalności zabezpieczonych powierzchni przez wodę. Pory i kapilary nie zostają wypełnione, a jedynie ich ścianki są powleczone preparatem.

## 7. Podsumowanie

Konstrukcje mostowe są obiektami o szczególnym znaczeniu strategicznym. Projektowana trwałość tych konstrukcji jest wielokrotnie dłuższa niż typowych obiektów budowlanych, a konsekwencje ekonomiczne i społeczne nadmiernej degradacji tych obiektów są znacznie poważniejsze. Wobec tego kluczowe jest zapewnienie trwałości konstrukcji mostowych już na etapie projektowania – w szczególności ważne jest racjonalne podejście do zagadnień materiałowych oraz użytkowych. W artykule podniesiono znaczenie dla trwałości oddziaływania CO<sub>2</sub> na beton w konstrukcjach mostowych, który w konsekwencji złożonych procesów fizykochemicznych prowadzi do uszkodzeń korozyjnych zbrojenia w warstwie otuliny betonowej. W odniesieniu do obiektów mostowych ważne dla zapewnienia trwałości jest stosowanie narzędzi ochrony materiałowo-strukturalnej oraz powierzchniowej, a także ochrony konstrukcyjnej. W przypadku agresji środowiska związanej z karbonatyzacją kluczowe jest ograniczenie zdolności dyfuzji CO<sub>2</sub> w samym betonie poprzez uzyskanie szczelnej struktury (m.in. poprzez niskie w/c) oraz odcięcie betonu od atmosfery powietrza poprzez zastosowanie powłok ochronnych oraz w szczególności zapewnienie wystarczającej grubości otuliny betonowej.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1990:2004: Eurokod, Podstawy projektowania konstrukcji
- [2] Kłos K., Adamczewski G., Woyciechowski P., Łukowski P., Karbonatyzacja betonu otuliny zbrojenia jako przyczyna utraty trwałości konstrukcji, *Awarie Budowlane, Międzyzdroje*, 2022
- [3] PN-EN 206+A2:2021-08: Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [4] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz.U. nr 63, poz. 735, z późn. zm.)
- [5] Furtak K., Śliwiński J., *Materiały budowlane w mostownictwie*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2004
- [6] Germaniuk K., Powłoki ochronne na mostach żelbetonowych – oczekiwania i rzeczywistość, *Awarie Budowlane, Międzyzdroje*, 2011
- [7] Woyciechowski P., *Model karbonatyzacji betonu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013
- [8] PN-EN 1992-1-1:2008: Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [9] Ściślewski Z., *Ochrona konstrukcji żelbetonowych*, Warszawa, Wydawnictwo Arkady, 1999
- [10] Czarnecki L., Emmons P. H., *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*, Polski Cement, Kraków, 2002
- [11] Czarnecki L., Łukowski P., Garbacz A., *Naprawa i ochrona konstrukcji z betonu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2017
- [12] PN-EN 1504-2:2006: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności – Część 2: Systemy ochrony powierzchniowej betonu
- [13] WWiORB M-13.01.00 v03: Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich