

niej były wynikiem długotrwałego zamakania betonu na skutek bardzo złego stanu pokrycia dachu. Uzyskanie podobnych wyników w innych elementach kielichowych pozwoliło stwierdzić, że istnieje możliwość dalszego użytkowania tej oryginalnej konstrukcji dworca pod warunkiem niedopuszczenia do nadmiernego zawilgocenia.

#### BIBLIOGRAFIA

[1] SUD Architectes Polska, Dworzec PKP w Katowicach. ARCHIVOLTA 4 (44)/2009, październik-grudzień 2009, s. 39–44

[2] Andrade C., Alonso C., Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site, Construction and Building Materials Vol. 10, No. 5, 1996, p. 315–328

[3] Lemoine L., Wenger F., Galland J., Study of the Corrosion of Concrete Reinforcement by Electrochemical Impedance

Measurement, Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, p. 118–133

[4] Ford S. J., Shane J. D., Manson T. O., Assignment of features in Impedance Spectra of the Cement-Paste/Steel System, Cement Concrete Research, Vol. 28, No. 12, 1998, p. 1737–1751

#### INFORMACJE O AUTORACH

**Prof. dr hab. inż. Adam Zybura** – kierownik Katedry Konstrukcji Budowlanych Politechniki

Śląskiej; zajmuje się problematyką trwałości konstrukcji budowlanych oraz modelowania procesów degradacji korozyjnej żelbetu.

**Dr inż. Mariusz Jaśniok, dr inż.**

**Tomasz Jaśniok** – adiunkci w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej; specjalizują się w zagadnieniach zaawansowanej diagnostyki korozyjnej konstrukcji żelbetowych.

**Adres do korespondencji:** Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice.

# Ocena wpływu stanu betonu w konstrukcji na szybkość procesu korozji zbrojenia w obiektach mostowych

**Dr inż. Tomasz Łakomy**

W artykule zaprezentowano wybrane wyniki i wnioski z badań polowych oraz obserwacji z przeglądów dziesięciu drogowych obiektów mostowych wybudowanych w dwóch wyraźnie różnych okresach czasu, około roku 1950 oraz około roku 1975. W trakcie badań analizowano przebieg w warunkach rzeczywistych oraz zależności między procesami karbonatyzacji, wnikania chlorków a szybkością korozji zbrojenia. Określono również wpływ cech wytrzymałościowych betonu oraz uwarunkowań konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i środowiskowych na szybkość korozji zbrojenia w konstrukcjach mostowych.

**Słowa kluczowe:** beton, stal zbrojeniowa, karbonatyzacja, chlorki, korozja, mosty.

## Influence of concrete condition in structure on steel corrosion in reinforced concrete bridges

In this paper in-situ test results and observations from site inspections of ten road bridges were presented. These bridges were erected in two significantly different time spans: around year 1950 and around year 1975. Progress of carbonation, chloride ingress and steel corrosion in real conditions and relationships among these processes were analyzed. Concrete compressive strength, applied construction solutions as well as working and environmental conditions were also taken into account.

**Key words:** concrete, steel, rebars, carbonation, chloride, corrosion, bridges.

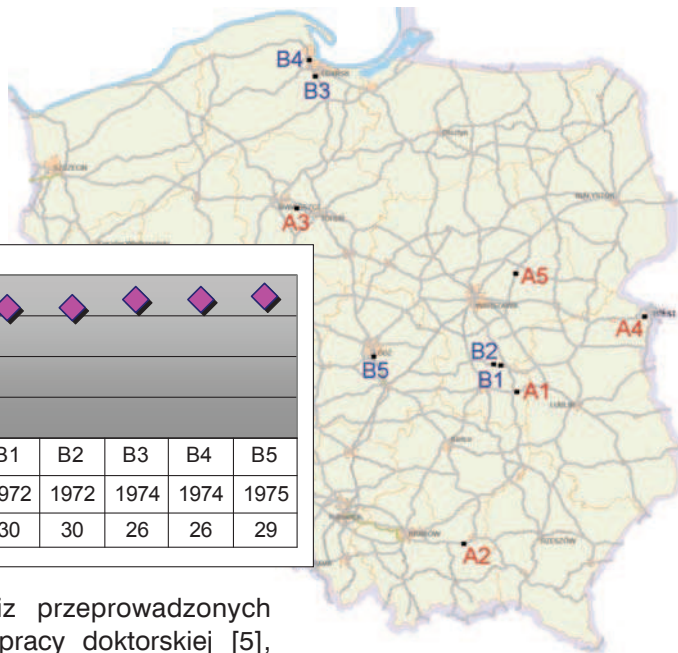
### 1. Wprowadzenie

Na skutek oddziaływania agresywnych czynników środowiska zewnętrznego i zachodzących pod ich wpływem reakcji wewnątrz struktury betonu, konstrukcje betonowe ulegają procesowi degradacji. W szczególności

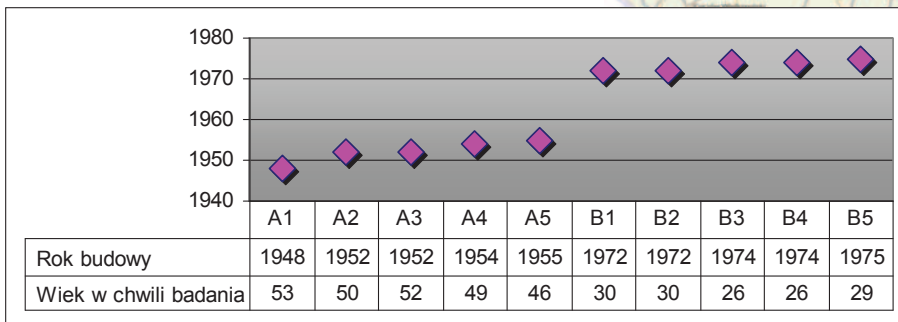
niekorzystnej sytuacji znajdują się obiekty komunikacyjne, które narażone są nie tylko na wpływ czynników środowiska naturalnego, ale również na oddziaływanie zanieczyszczeń przemysłowych oraz soli odladzających wykorzystywanych w zimowym utrzymaniu dróg [1], [2], [3], [4].

Za główne przyczyny niszczenia betonowych obiektów komunikacyjnych w Polsce uznaje się korozję mrozową oraz korozję stali zbrojeniowej. Rozwój procesu korozji stali zbrojeniowej prowadzi do obniżenia trwałości obiektu, a w zaawansowanym stadium również do obniżenia jego nośności

**Rys. 2.** Lokalizacja wytypowanych obiektów  
**Fig. 2.** Location of tested bridges



**Rys. 1.** Zestawienie wieku wytypowanych obiektów  
**Fig. 1.** Comparison of ages of tested bridges



i konieczności podjęcia kosztownych remontów.

Od lat nie ustają wysiłki zmierzające do lepszego zrozumienia zagadnienia korozji zbrojenia, w celu jej maksymalnego ograniczenia, a w konsekwencji zwiększenia trwałości obiektów betonowych. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych powstało wiele modeli opisujących proces utraty właściwości ochronnych otuliny betonowej i rozwoju korozji zbrojenia. Jak pokazują jednak badania diagnostyczne, wykonywane na obiektach eksploatowanych w warunkach rzeczywistych, istnieje wiele rozbieżności co do oczekiwanych i mierzonych w terenie wartości. Przyczyną tych rozbieżności jest niejednorodność struktury betonu oraz zmienne w czasie i zróżnicowane oddziaływanie czynników środowiskowych i eksploatacyjnych na poszczególne fragmenty konstrukcji. W efekcie otulina betonowa w różnym stopniu i z różną szybkością traci swoje właściwości ochronne względem zbrojenia.

Wciąż aktualne jest więc pytanie, w jaki sposób można precyzyjniej określić szybkość z jaką otulina będzie tracić właściwości ochronne, a zbrojenie ulegać procesowi korozji.

## 2. Przedmiot badań

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane wyniki badań i wnioski

z analiz przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej [5], której przedmiotem były dwie grupy obiektów mostowych o wyraźnie różnym wieku:

- grupa A – obiekty wybudowane około roku 1950,
- grupa B – obiekty wybudowane około roku 1975.

Spośród dużej grupy obiektów przebadanych kompleksowo między rokiem 2000 a rokiem 2004, autor wytypował 10 obiektów – po 5 obiektów do grup A i B. Głównym kryterium wyboru obiektów był ich

wiek. Obiekty grupy A oznaczono jako A1, A2, ... A5, a obiekty grupy B jako B1, B2, ... B5.

Lokalizację wytypowanych obiektów przedstawiono w formie graficznej na rysunku 2, a ich podział pod względem wieku na rysunku 1. W tabeli 1 przedstawiono natomiast podział wytypowanych obiektów pod względem ich rodzaju, rodzaju przeszkody i otoczenia oraz typu ustroju niosącego.

**Tabela 1.** Podział wytypowanych obiektów

**Table 1.** Classification of tested bridges

Kategoria podziału	Liczba obiektów	Numerы obiektów
<b>Rodzaj obiektu</b>		
Most drogowy	5	A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>4</sub> , A <sub>5</sub> , B <sub>2</sub>
Wiadukt drogowy	5	A <sub>3</sub> , B <sub>1</sub> , B <sub>3</sub> , B <sub>4</sub> , B <sub>5</sub>
<b>Rodzaj przeszkody</b>		
– rzeka	5	A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>4</sub> , A <sub>5</sub> , B <sub>2</sub>
– linia kolejowa	4	A <sub>3</sub> , B <sub>1</sub> , B <sub>4</sub> , B <sub>5</sub>
– droga krajowa	1	B <sub>3</sub>
– ulica	1	B <sub>5</sub>
<b>Otoczenie obiektu</b>		
– rejon rolniczy (most drogowy)	5	A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>4</sub> , A <sub>5</sub> , B <sub>2</sub>
– rejon rolniczy (wiadukt drogowy)	4	A <sub>3</sub> , B <sub>1</sub> , B <sub>3</sub> , B <sub>4</sub>
– aglomeracja miejska (wiadukt drogowy)	1	B <sub>5</sub>
<b>Ustrój niosący obiektu</b>		
– monolityczny	6	A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>3</sub> , A <sub>4</sub> , A <sub>5</sub> , B <sub>1</sub>
– zespolony (typu „beton-beton”)	1	B <sub>2</sub>
– z belkowych elementów prefabrykowanych	3	B <sub>3</sub> , B <sub>4</sub> , B <sub>5</sub>
<b>Rodzaj elementów głównych</b>		
– belki żelbetowe	6	A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>3</sub> , A <sub>4</sub> , A <sub>5</sub> , B <sub>1</sub>
– belki strunobetonowe	4	B <sub>2</sub> , B <sub>3</sub> , B <sub>4</sub> , B <sub>5</sub>

Celem badań było poznanie rzeczywistej odporności betonu w eksploatowanych obiektach mostowych na procesy karbonatyzacji i wnikania chlorków, określenie zależności między tymi procesami a szybkością procesu korozji zbrojenia oraz ustalenie wpływu uwarunkowań konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i środowiskowych na szybkość procesu korozji zbrojenia w obiektach mostowych.

### 3. Procedury pomiarowe

Na każdym z wytypowanych obiektów zaplanowany program badawczy obejmował:

- pomiar wytrzymałości betonu na ściskanie na podstawie: laboratoryjnych badań odwiertów kontrolnych wyciętych z konstrukcji, metody „pull-out” oraz metody sklerometrycznej,
  - pomiar grubości otuliny w sposób nieniszczący metodą elektromagnetyczną oraz bezpośrednio w odkuwkach,
  - pomiar głębokości karbonatyzacji betonu oraz wyznaczenie profili karbonatyzacji (rozkład pH w przekroju betonowym) przy użyciu kompozycji odczynników (test tęczowy),
  - pomiar rozkładu stężenia chlorków (profil chlorkowy) i głębokości skażenia betonu chlorkami na podstawie badań „zwiercin” betonowych pobranych z konstrukcji oraz oznaczenie zawartości chlorków rozpuszczalnych w kwasach w poszczególnych próbkach betonowych metodą miareczkowania,
  - pomiar ubytków korozyjnych prętów zbrojeniowych bezpośrednio w odkuwkach,
  - lokalizację obszarów wysokiego zagrożenia korozyjnego zbrojenia na podstawie wykonanych map rozkładu potencjału stacjonarnego i rezystywności betonu otuliny,
  - przegląd konstrukcji w celu ustalenia rodzaju uszkodzeń i przyczyn destrukcji obiektu oraz ich wpływu na proces korozji zbrojenia.
- Szybkość korozji zbrojenia w obecności chlorków wyznaczo-

no na podstawie uzyskanych profili chlorkowych oraz przy wykorzystaniu wzorów wyprowadzonych na podstawie drugiego prawa Ficka [6].

Szybkość korozji zbrojenia pod wpływem procesu karbonatyzacji wyznaczono na podstawie pomierzonych głębokości karbonatyzacji i zbadanej wytrzymałości betonu na ściskanie, przy wykorzystaniu wzoru  $h = (K_c \cdot t^{1/2})$ , gdzie  $h$  [mm],  $t$  [lata],  $K_c$  [mm/lata<sup>1/2</sup>] wg [1].

### 4. Wybrane wyniki badań i wnioski

Połączona analiza wielkości ubytków korozyjnych zbrojenia oraz wyników badań chemicznych betonu (karbonatyzacja/chlorki) dwóch wyraźnie różniących się wiekiem grup drogowych obiektów mostowych, wraz ze spostrzeżeniami poczynionymi w trakcie ich przeglądów, pozwoliły na sformułowanie poniższych wniosków:

– **Największe zagrożenie korozyjne zbrojenia stanowią chlorki.** Chlorki pochodzące z soli odładowanych, pomimo krótkotrwałego, lecz intensywnego stosowania w okresie zimowym, wywołują znacznie większe ubytki korozyjne na zbrojeniu (około 6÷7 razy większe) niż proces karbonatyzacji betonu otuliny (rys. 3).

Analogicznie, wyliczona szybkość korozji zbrojenia w obecności chlorków (0÷55  $\mu\text{m}/\text{rok}$ ), choć znacznie zróżnicowana, to jednak była wielokrotnie większa od szybkości korozji zbrojenia w betonie skarbonatyzowanym (–2÷4  $\mu\text{m}/\text{rok}$ ).

– **Największe ubytki korozyjne występują w miejscach, gdzie poza skażeniem chlorkami dochodzi również do karbonatyzacji otuliny.**

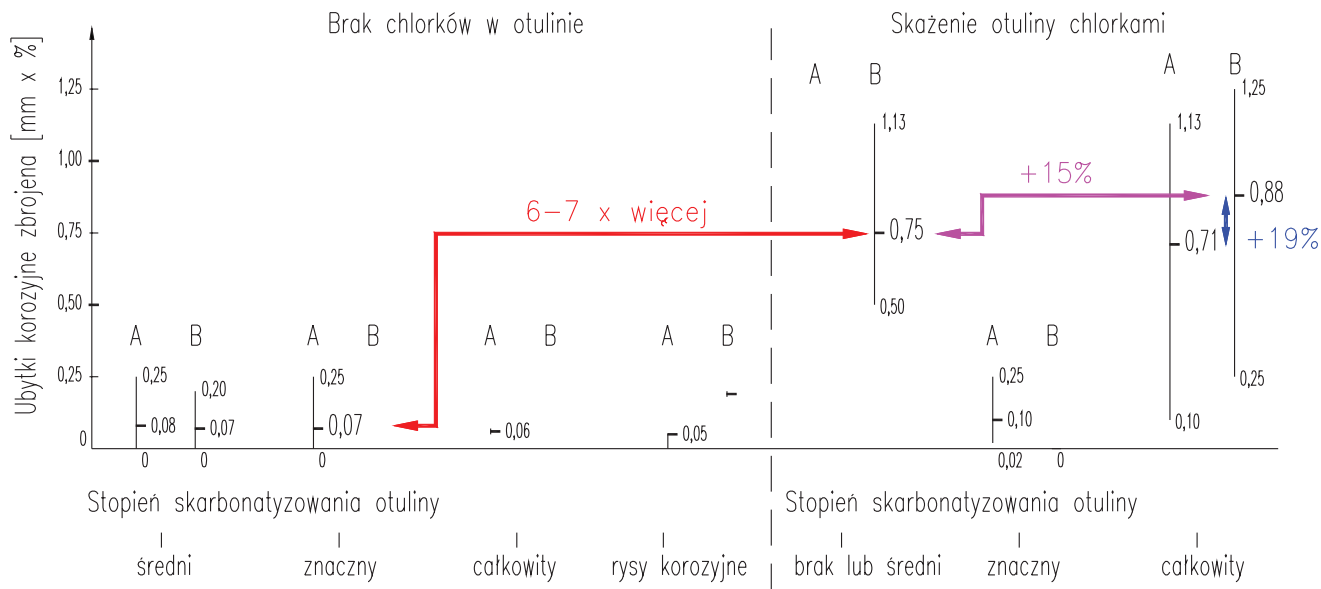
Potwierdzono wpływ synergicznego oddziaływania chlorków i karbonatyzacji na zwiększenie ubytków korozyjnych zbrojenia – ubytki korozyjne zbrojenia w miejscach, gdzie doszło do jednoczesnego przekroczenia dopuszczalnego

stężenia chlorków na głębokości zbrojenia i całkowitej karbonatyzacji otuliny były o 15% większe niż w miejscach, gdzie doszło jedynie do przekroczenia dopuszczalnego stężenia chlorków (rys. 3).

Największe ubytki korozyjne zbrojenia, spowodowane oddziaływaniem chlorków lub synergicznym oddziaływaniem chlorków i karbonatyzacji, zaobserwowano na fragmentach ustrojów niosących i podpór znajdujących się poniżej nieszczelnych urządzeń dylatacyjnych i w miejscach uszkodzeń izolacji przeciwwodnej pomostów – najczęściej w strefach podkrawężnikowych i podchodnikowych oraz wokół miejsc osadzenia urządzeń odwadniających, a w wiaduktach nad drogami – na fragmentach podpór w rejonach rozbryzgów wody spod kół przejeżdżających pod obiektem pojazdów.

– **W obiektach wybudowanych w połowie lat siedemdziesiątych (grupa B) zastosowano rozwiązania konstrukcyjne zapewniające mniejszą trwałość obiektów ze względu na korozję zbrojenia, niż w obiektach wybudowanych w latach pięćdziesiątych (grupa A) –** ubytki korozyjne zbrojenia przy synergicznym działaniu chlorków i karbonatyzacji, w młodszej grupie wiekowej (B) były o około 19% większe niż w grupie starszej (A) (rys. 3). Przekroczenie dopuszczalnego stężenia chlorków na głębokości zbrojenia i spowodowane nim znaczne ubytki korozyjne stali sprężającej, stwierdzono w belkach trzech obiektów o przęsłach prefabrykowanych, już po około 26÷29 latach ich eksploatacji, podczas gdy okres ich użytkowania powinien wynieść nie mniej niż 60 lat oraz pomimo zastosowania betonu klas B35 i B40.

– **Wiek obiektu nie odgrywa kluczowego znaczenia w procesie korozji zbrojenia, znacznie istotniejszy jest stan betonu. Wyniki analiz wykazały, że o szybkości procesu korozji zbrojenia decydują parametry betonu odpowiedzialne za jego szczelność.**



**Rys. 3.** Porównanie ubytków korozyjnych dla obiektów z grup A i B

**Fig. 3.** Comparison of steel losses due to corrosion in two groups of tested bridges A and B

#### – Wpływ ekspozycji obiektu.

W trakcie badań wykazano, że skażenie betonu otuliny chlorkami w obiektach komunikacyjnych jest głównie związane z przeciekami, zaciekami i zachlapywaniem konstrukcji wodą zawierającą sole odladzające – w tych rejonach stężenie chlorków na głębokości zbrojenia dochodziło do 0,5÷3,4% masy cementu, podczas gdy stężenie dopuszczalne wynosi 0,1÷0,4% [7].

Potwierdzono również, iż zasięg procesu karbonatyzacji jest większy na powierzchniach wewnętrznych ustrojów niosących (osłoniętych przed bezpośrednim oddziaływaniem takich czynników atmosferycznych jak deszcz i nasłonecznienie), niż na ich powierzchniach zewnętrznych.

Powyższe wnioski pozwoliły z kolei na sformułowanie następujących zaleceń odnośnie zwiększenia bezpieczeństwa użytkowania i trwałości drogowych obiektów mostowych:

– w całym okresie, od etapu projektowania przez wykonawstwo i dalsze utrzymanie, należy zwracać szczególną uwagę na miejsca, w których może dochodzić do skażenia otuliny chlorkami;

– w elementach konstrukcyjnych narażonych na działanie chlorków, podejmować działania zmierzające do ograniczenia szybkości ich wnikania w beton, na przykład przez stosowanie betonów szczelnych, powłok ochronnych oraz uszczelnień, poprzez likwidację szczelin dylatacyjnych w konstrukcjach istniejących;

– zapewniać sprawne odprowadzenie wody z nawierzchni konstrukcji – przestrzegać minimalnych pochyłeń na nawierzchni jezdni i chodników oraz nie dopuszczać do tworzenia się zastoisk wody (koleiny, zanieczyszczenia, niedrożne wpusty);

– usuwać w możliwie krótkim czasie uszkodzenia w zabezpieczeniu konstrukcji przed wnikaniem chlorków – wymieniać uszkodzone fragmenty izolacji pomostu, nieszczelne urządzenia dylatacyjne, odspojone uszczelnienia.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Czarniecki L., Emmons P. H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2002
- [2] Ścisłowski Z., Ochrona konstrukcji żelbetowych, Arkady, Warszawa 1999
- [3] Madaj A., Wołowicki W., Budowa i utrzymanie mostów, WKŁ, Warszawa 2007
- [4] Kubicki J., Zybura A., Ochrona przed korozją, 6, 1998, 154–161

[5] Łakomy T., Rozprawa doktorska, Korozja zbrojenia w obiektach mostowych w zależności od stanu betonu w konstrukcji, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009

[6] Poulsen E., Chloride Profiles – Analysis and Interpretation of Observations, AEClaboratory, 1995

[7] Rozp. MTiGM z 30.05.2000 w sprawie „Warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie”. Dz.U. RP Nr 63 z 03.08.2000

#### INFORMACJE O AUTORZE

**Dr inż. Tomasz Łakomy** – Politechnika Wrocławska, TARCOPOL Sp. z o.o. Oddział Wrocław TPM Consulting, procesy degradacji, defektoskopia, badania in-situ oraz projekty napraw i zabezpieczeń antykorozyjnych na konstrukcjach inżynierskich, tлакomy@tpm-consulting.com.pl

**Adres do korespondencji:** Dr inż. Tomasz Łakomy, TARCOPOL Sp. z o.o. Oddział Wrocław TPM Consulting, ul. Stanisławowska 27, 54–611 Wrocław.