

prof. dr hab. inż. Józef Jasiczak¹⁾
ORCID: 0000-0003-3643-9819

Korozja i zabezpieczenia betonowych stropów żebrowych w wielkogabarytowych zbiornikach wody przeznaczonej do spożycia

Corrosion and protection of concrete rib ceilings in large-size drinking water tanks

DOI: 10.15199/33.2022.04.08

Streszczenie. Artykuł dotyczy wpływu czynników środowiskowych na trwałość żelbetonowych zbiorników na wodę do picia. Przeanalizowano procesy korozyjne zarejestrowane w kołowych, ponadpięćdziesięcioletnich, sprężonych, nadziemnych, zbiornikach żelbetonowych o pojemności 5000 m³, występujące szczególnie w obrębie prefabrykowanych, żebrowych stropów żelbetonowych. Opisano proces destrukcji betonu i stali zbrojeniowej oraz zaproponowano metody naprawy. Wybór materiałów zabezpieczających konstrukcje jest dość skomplikowany, trudno wybrać tylko jeden rodzaj materiału zapewniającego bezpieczną użyteczność zbiornika.

Słowa kluczowe: zbiorniki wody do picia; stropy żelbetowe żebrowe; oddziaływania korozyjne wody.

Abstract. The article deals with environmental influences on the durability of reinforced concrete tanks for drinking water. The corrosion processes recorded in circular, over 50-year-old, compressed, above-ground, reinforced concrete tanks with a capacity of 5000 m³, occurring especially within prefabricated, ribbed reinforced concrete ceilings, were analyzed. The process of concrete and reinforcing steel destruction is described and repair methods are proposed. The choice of materials protecting the structures is quite complicated, it is difficult to choose only one type of material ensuring the safe usability of the tank.

Keywords: drinking water tanks; ribbed reinforced concrete ceilings; corrosive effects of water.

Problemem trwałości betonu w zbiornikach magazynujących wodę przeznaczoną do spożycia nie jest tak często opisywany jak korozja zbiorników na ścieki komunalne i przemysłowe. Wynika to z dosyć małej agresywności wody przeznaczonej do spożycia, która jest dezynfekowana. W praktyce zbiorniki na wodę do picia wykazują jednak wiele wad mających wpływ na trwałość. Często opisywana jest korozja stropów znajdujących się bezpośrednio ponad lustrem wody, dotycząca samego betonu (korozja ługująca [3]), jak i betonu oraz stali, wywołana z kolei chlorkami różnego pochodzenia [6, 11, 13]. Proces chlorowania wody przeznaczonej do spożycia w celu jej dezynfekcji, szczególnie w wielkich aglomeracjach miejskich, jest powszechny, a zawartość chloru (w postaci wolnej lub jego związków) waha się od 0,1 ÷ 0,3 g/m³ wody (Poznań) do 1 ÷ 5 g/m³ wody [8]. Wpływ

związków chloru na trwałość materiałów rozpatrywany jest najczęściej w aspekcie trwałości armatury przesyłowej [1, 8, 12], natomiast nieliczne publikacje wskazują na ich korozyjne oddziaływanie także na konstrukcje żelbetowe. Sugestie takie pojawiają się w kontekście projektowania zbiorników żelbetonowych [4, 5, 9], a nie przy okazji problemów z magazynowaniem wody przeznaczonej do spożycia.

Konstrukcja analizowanych zbiorników

Zbiorniki zaprojektowano w 1965 r. jako żelbetowe, kołowe, prefabrykowane, sprężone zewnętrznie, częściowo zagłębione w gruncie, o średnicy wewnętrznej 25 m i wysokości 10,50 m. Jako przekrycie zbiornika zastosowano 50 prefabrykowanych zbieżnych płyt żebrowych o wysokości 45 cm i rozpiętości 9,00 m z betonu marki $R_w = 200$ (obecnie C16/20), zbrojonych stalą żebrowaną. Szerokość płyt od strony zewnętrznej ściany zbiornika wynosi 1,50 m, natomiast w części środkowej 0,35 m.

Płyty opierają się na zewnętrznej ścianie obwodowej za pośrednictwem wieńca o łącznej szerokości z żebrem czołowym płyty 0,25 m. W części środkowej płyty opierają się na monolitycznym pierścieniu wspartym na centralnym słupie. Pierścień ma zewnętrzną średnicę 6,16 m, wysokość 1,00 m oraz uzębienie promieniowe i obwodowe, a środkowy wewnętrzny słup jest o przekroju kołowym, średnicy 600 mm i wysokości 9,50 m do spodu głowicy.

Pojedynczy prefabrykat stropowy ma dwa żebra podłużne – 80 x 420 mm ze zbrojeniem podłużnym $\varnothing 20$ mm ze strzemionami $\varnothing 8$ mm co 200 mm, żebra poprzeczne 60 x 120 mm ze zbrojeniem $\varnothing 8$ mm bez strzemion i płytę o grubości 50 mm ze zbrojeniem $\varnothing 6$ mm co 150 mm. Widok stropu od spodu pokazano na fotografii 1.

Badania polowe i laboratoryjne

Badania betonu w elementach konstrukcyjnych przekrycia zbiornika wykazały dobre parametry wytrzymałości

¹⁾ Politechnika Poznańska; Instytut Budownictwa; jozef.jasiczak@put.poznan.pl



Fot. 1. Elementy stropu żebrowego
Photo 1. Elements of the ribbed floor

ściowe – beton we wszystkich badanych miejscach charakteryzował się większą wytrzymałością na ściskanie od projektowanej (C16/20). W płycie między żebrowymi uzyskano wytrzymałość charakterystyczną $f_{ck} = 26,8$ MPa, a w żebrowych poprzecznych oraz w żebrowych podłużnych $f_{ck} = 41,5 - 41,8$ MPa wobec projektowanej wytrzymałości 20 MPa. Z kolei beton wewnętrznej monolitycznej głowicy wykazywał wytrzymałość charakterystyczną $f_{ck} = 21,7$ MPa, a został zaprojektowany z betonu marki $R_w = 170$ (obecnie C12/15). Żebrowe płyty panwiowe stanowiące przekrycie zbiornika wykazują znaczne ubytki otuliny betonowej w dolnych fragmentach żebrowych podłużnych oraz poprzecznych (fotografia 2a) oraz silną korozję prętów

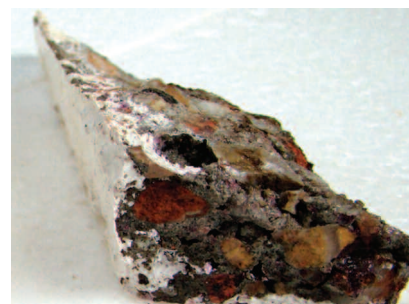


Fot. 2. Odpadnięcie otuliny z żebra podłużnego i poprzecznego. Odległość między korodującymi strzemiętami – 20 cm; a) całkowita korozja pręta $\varnothing 8$ mm; b) widoczne zarysowanie betonu wzdłuż zbrojenia

Photo 2. The cover falls off the longitudinal and transverse ribs. The distance between corroded stirrups – 20 cm; a) total bar corrosion $\varnothing 8$ mm; b) visible scratching of the concrete along the reinforcement

zbrojeniowych. Występują zarysowania podłużne żebrowych (fotografia 2b) i rdzawe, ciągłe i punktowe zacieki na betonowej otulinie. Ponadto bezpośrednio w obiekcie wykonano testy chemiczne dotyczące karbonatyzacji betonu i zawartości w nim innych związków przyspieszających korozję prętów zbrojeniowych. Stwierdzono zjawisko neutralizacji otuliny prętów zbrojeniowych na głębokości do 40 mm, co skutkuje utratą zdolności betonu do pasywacji stali. Widoczne są grube ziarna kruszywa i brak szczelności stosu okruszowego. Pomalowanie od spodu powierzchnii betonu ciągłą powłoką żywiczną w praktyce nie zapewniło należytej jej szczelności i umożliwiło rozwój procesu korozyjnego konstrukcji pokazanego na fotografii 3.

Ze względu na powszechny proces chlorowania wody wykonano laboratoryjne badania skaningowe EDS i SEM, by sprawdzić obecność jonów chloru i innych pierwiastków w strukturze kamienia cementowego. Na rysunku 1 pokazano typowy rozkład pierwiastkowy

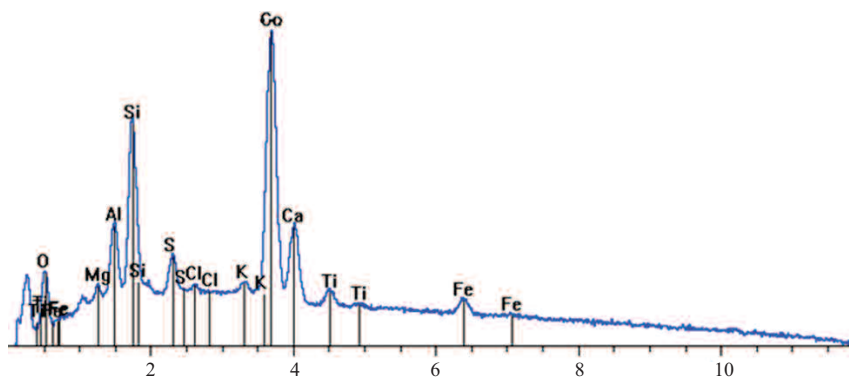


Fot. 3. Struktura betonu otuliny na grubości 40 mm

Photo 3. Structure of concrete cover at a height of 40 mm

analizowanej próbki betonu, a w tabelach (miejsce 1 i 2) wagowy i atomowy udział pierwiastków w zależności od odległości od powierzchni próbki.

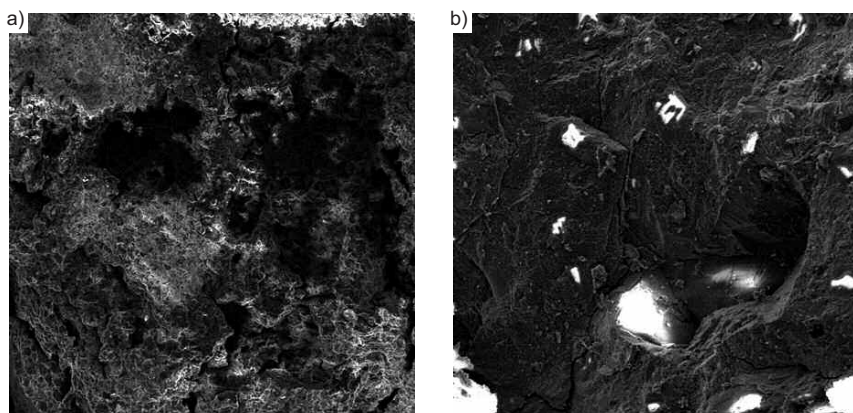
Zwraca uwagę duża zawartość wagiowa jonów chlorkowych (0,57 – 1,02% masy), znacznie przekraczająca wartości dopuszczalne podawane w literaturze [14] oraz jonów tytanu (2,36 – 26,68% masy), będącego składnikiem stosowanych farb epoksydowych (biel tytanowa). Na fotografii 4 pokazano obrazy SEM powierzchni próbki i jej we-



Pierwiastki chemiczne	Udział wagowy Wt [%]	Udział atomowy At [%]
O	67,56	80,72
Mg	2,45	1,93
Al	5,86	4,15
Si	8,18	5,57
S	1,21	0,72
Cl	1,02	0,55
Ca	11,36	5,42
Ti	2,36	0,94
Fe	0,00	0,00
K	0,00	0,00
Razem	100,00	100,00

Pierwiastki chemiczne	Udział wagowy Wt [%]	Udział atomowy At [%]
O	36,97	59,49
Mg	1,20	1,27
Al	3,08	2,94
Si	5,36	4,92
S	0,56	0,45
Cl	0,57	0,41
Ca	23,31	14,97
Ti	28,68	15,42
Fe	0,27	0,12
K	0,00	0,00
Razem	100,00	100,00

Rys. 1. Analiza EDS próbki betonu pobranej ze skorodowanej części stropu żebrowego
Fig. 1. EDS analysis of a concrete sample taken from the corroded part of the ribbed floor



Fot. 4. Mikrografie próbek: a) nieciągła warstwa powłoki żywicznej na powierzchni próbki; b) wyraźne mikrozarysowania wewnętrzne kamienia cementowego

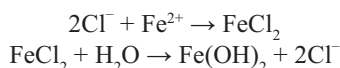
Photo 4. Sample micrographs: a) discontinuous layer of resin coating on the surface of the sample; b) there are visible internal micro-scratches on the cement stone

wewnętrzne mikrorysy ułatwiające migrację jonów chlorkowych w głąb matrycy i rozwój procesów korozyjnych betonu.

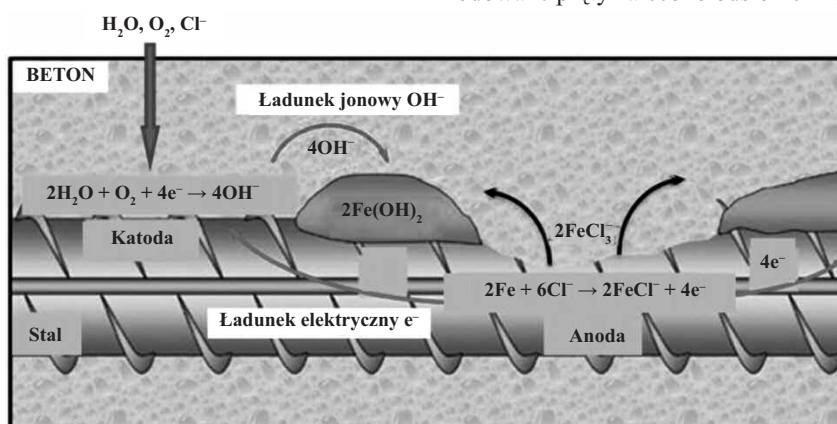
Analiza uzyskanych wyników badań i zalecane metody naprawy

Podczas ponadpięćdziesięcioletniej eksploatacji zbiorników dokonałem wielu ocen w różnych terminach związanych z pojawianiem się sytuacji awaryjnych. W początkowej fazie eksploatacji można było na powierzchni stropu zaobserwować punktowe przebarwienia betonu na rdzawy kolor, usytuowane w jednej linii wzdłuż otuliny pręta zbrojeniowego.

W miarę upływu czasu, w warunkach wysokiego zawilgocenia i występowania oparów chlorowanej wody, przebarwiony beton tworzył już linie ciągłe. Był to sygnał, że pręt zbrojeniowy koroduje na całej długości i w znacznym stopniu zmniejszyła się jego średnica w wyniku postępu korozji chlorkowej. Korozja stali przebiega w sposób ciągły wg reakcji [2, 13]:

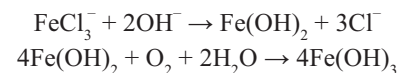


Jony Cl^- powodują zmianę cech warstwy pasywacyjnej, w wyniku czego powstaje Fe(OH)_2 . Reakcje na katodzie są analogiczne jak w betonie nienarażonym na działanie chlorków, natomiast na anodzie powstaje FeCl_3^- (rysunek 2). W dalszej kolejności FeCl_3^- reaguje z grupą wodorotlenową, tworząc rozpuszczalny wodorotlenek żelaza zgodnie z reakcją:



Rys. 2. Mechanizm korozji zbrojenia w obecności jonów chlorkowych [2]

Fig. 2. The corrosion mechanism of the reinforcement in the presence of chloride ions [2]



Wodorotlenek żelaza reaguje dalej, tworząc rdzę, a uwolnione jony chlorkowe ponownie wchodzi w reakcję z żelazem i jest to reakcja chemiczna występująca w sposób ciągły. Pęczniące tlenki stali powodują pękanie i odpadanie otuliny, a w wyniku tej reakcji bardzo szybko powstają głębokie wżery w zbrojeniu. Objętość produktów korozji jest 2 – 7 razy większa niż objętość żelaza [7], co prowadzi do powstawania naprężeń w betonie, a w dalszej kolejności pojawiają się rysy, spękania, złuszczenie betonu i zmniejszenie średnicy prętów, co szczegółowo pokazano na fotografiach 1, 2, 3. Płyty przekrycia zbiornika nie wykazywały natomiast przekroczenia obciążeń, które ujawniają się w postaci nadmiernych ugięć czy załamań, co świadczy o zachowaniu dopuszczalnej wartości ich nośności.

Naprawa płyt żebrowych jest skomplikowana ze względu na duże uszkodzenia żeber i płyt, polegające na ubytku betonu żeber, i korozję stali zbrojeniowej przy stałej obecności jonów chlorkowych. Pierwszy etap naprawy obejmuje **oczyszczenie płyt od spodu** przez np. piaskowanie (suchy piasek tłoczony na beton pod ciśnieniem) w celu usunięcia skorodowanych warstw betonu oraz oczyszczenia skorodowanej powierzchni stali (fotografia 5).

Widoczne pęknięcia podłużne betonu, pod którymi znajdują się skorodowane pręty zbrojeniowe, stanowią potencjalne źródło korozji wżerowej. Skorodowane pręty zalecono odsłonić i za-

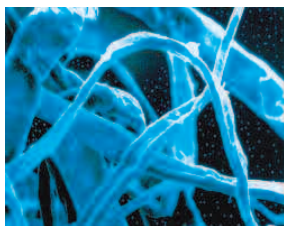


Fot. 5. Wypiaskowane żebra i płyta; odsłonięte pręty zbrojeniowe

Photo 5. Sandblasted ribs and plate; exposed rebars

bezpieczyć antykorozyjnie. Możliwe jest zabezpieczenie stali przed korozją materiałem hamującym rozwój korozji stali.

Kolejny etap to **reprofilacja ubytków otuliny** betonem natryskowym na drobnym kruszywie z dodatkiem włókien syntetycznych wg metody opracowanej przez wyspecjalizowane w tej



ARBOCEL – The Power of Reinforcement

– wyjątkowe włókna na bazie celulozy, redukujące ilość powstających rys/mikropęknięć i spękań tynków, szpachli i farb



Rettenmaier Polska
Sp. z o.o.
Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B
02-366 Warszawa
mobile +48 600 423 423
Tel + 48 22 608 51 00
e-mail: arbocel@jrs.pl

technologii firmy budowlane. W przedmiotowych zbiornikach reprofilowano żebra i płytę do uzyskania pierwotnego kształtu oraz odtworzono otulinę o grubości 15 mm na pozostałych powierzchniach. Zasadniczą odbudowę betonu konstrukcyjnego kończy **naniesienie na wszystkie powierzchnie betonowe migrujących jonów inhibitora korozji** w celu ochrony antykorozyjnej zbrojenia. Wieloletnie doświadczenie wykazuje, że po miesięcznej przerwie zalecane jest wykonanie na całej konstrukcji stropu warstwy ochronnej odcinającej beton i zbrojenie od wilgoci i związków chloru, np. z zastosowaniem dwuskładnikowej, utwardzanej adduktami aminowymi farby fenolowo-epoksydowej z atestem PZH do zbiorników wody pitnej. Farbę należy nanosić natryskiem w dwóch warstwach, by osiągnąć minimalną grubość 160 µm).

Podsumowanie

Obiekty o dużej pojemności powinny wykazywać trwałość przekraczającą 50 lat. W celu jej zapewnienia, jak zaleca norma PN-EN 1504 [10], należy wdrożyć odpowiednią strategię zarządzania konstrukcją. Praktyka pokazała, że cykle naprawcze w czasie użytkowania konstrukcji są różne w przypadku płyty dennej, ścian i stropu żebrowego. Elementy eksploatowane poniżej lustra wody wymagają naprawy – renowacji powłok zabezpieczających beton średnio raz na 25 lat, natomiast stropy żebrowe krótszych cykli konserwacyjnych 11 – 15 lat. Różnica wynika z warunków środowiskowych, czyli bardzo dużej wilgotności względnej powietrza ponad lustrem wody, wykrapłania się wody zawierającej związki chloru na dolnych powierzchniach stropu, ale także zbyt małej grubości betonowej otuliny prętów zbrojeniowych.

Jak wykazują współczesne badania [14], przy występowaniu tylko korozji ługującej bezpieczna grubość otuliny prętów zbrojeniowych powinna wynosić 20 mm (minimum zapewniające pasywację prętów to 12 mm), a przy występowaniu także jonów chlorkowych – 40 mm (przy grubości 24 mm stężenie chlorków w matrycy może przekroczyć wagowo 0,4%, co jest powodem opisanej korozji chlorkowej stali). W analizo-

wanym przypadku stężenie jonów chlorkowych w betonie stropu przekraczało tę wartość (0,57 – 1,02 %), a skuteczną ochroną przed wnikaniem okazały się przedstawione metody naprawy, w tym atestowane przez PZH powłoki żywiczne, pod warunkiem ich szczelnego nałożenia.

Wszystkie fotografie: Autor

Literatura

- [1] Cantor A., J. Park, P. Vaiyavatjamai. 2003. „Effect of chlorine on corrosion in Drinking Water Systems”. *Journal of American Water Works Association* p. 68. DOI: 10.1002/j.1551-8833.2003.tb10366.x.
- [2] Dąbrowska M. 2014. *Wpływ popiołu lotnego wapiennego na odporność korozyjną kompozytów wykonanych z cementu portlandzkiego wieloskładnikowego*. Praca doktorska. Gliwice, s. 155.
- [3] Fyall Z., L. Wysocki. 2022. „Korozja ługująca w żelbetowych zbiornikach do magazynowania wody przeznaczonej do spożycia”. *Materiały Budowlane* 594 (2): 27 – 30.
- [4] Halicka A.. 2014. „Specyfika projektowania zbiorników na ciecze”. *Inżynier Budownictwa* 12: 82 – 88.
- [5] Halicka A., D. Franczak. 2013. *Projektowanie zbiorników żelbetowych. Tom 2: Zbiorniki na ciecze*. PWN, Warszawa, s. 367.
- [6] Hansson C. M., Th. Frølund, J. B. Markussen. 1985. „The effect of chloride cation type on the corrosion of steel in concrete by chloride salts”. *Cement and Concrete Research*, vol. 15, p. 65 – 73.
- [7] Hansson C. M., A. Poursaeed, S. J. Jaffer. 2012. „Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete”. *The Masterbuilder*, p. 106 – 124.
- [8] Mackey E. D., T. F. Seacord. 2017. „Guidelines for Using Stainless Steel in the Water and Desalination Industries”. *Journal AWWA. American Water Works Association* p. 158 – 169.
- [9] PN-EN 1992-3:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3. Silosy i zbiorniki.
- [10] PN-EN 1504:PN-EN 1504:2005: Wyroby i systemy do napraw i ochrony konstrukcji betonowych, Cz. 10: Stosowanie wyrobów i systemów na placu budowy oraz sterowanie jakością prac.
- [11] Ściślewski Z. 1999. *Ochrona konstrukcji żelbetowych*. Arkady, Warszawa, s. 196.
- [12] Tuthill A. H., R. E. Avery, S. Lamb, G. Kobrin. 1998. „Effect of Chlorine on Common Materials in Fresh Water”. *Materials Performance* 37 (11): 52 – 56.
- [13] Wiecek G. 2002. *Korozja betonu inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny*. DWE, Wrocław, s. 377.
- [14] Zybura A., M. Jaśniok, T. Jaśniok. 2012. „Ocena zagrożenia korozją zbrojenia konstrukcji żelbetowych. Cz. 1. – Badania właściwości ochronnych betonu”. *Przegląd Budowlany* 11: 29 – 35.

Artykuł objęty uczelnianym programem badawczym Nr 0412/SBAD/0050.

Przyjęto do druku: 25.02.2022 r.