

mgr inż. arch. Zuzanna Fyall^{1)*}

ORCID: 0000-0002-3695-6659

dr inż. Leszek Wysocki, prof. uczelni¹⁾

ORCID: 0000-0002-2424-7214

Korozja ługująca w żelbetowych zbiornikach do magazynowania wody przeznaczonej do spożycia

Leaching corrosion in reinforced concrete tanks intended for storing potable water

DOI: 10.15199/33.2022.02.07

Streszczenie. W artykule opisano problem oceny zagrożeń spowodowanych działaniem miękkiej wody na żelbetowe konstrukcje zbiorników do magazynowania wody przeznaczonej do spożycia. Podstawą tej oceny były wyniki badań trzech eksploatowanych zbiorników betonowych o pojemności 5, 10 oraz 16 tys. m³, eksploatowanych odpowiednio przez 2, 50 i 100 lat. Podstawowym celem przeprowadzonych badań było określenie wielkości wybranych parametrów wody decydujących o stopniu zagrożenia korozyjnego dla betonu. Opisano rodzaj i zakres uszkodzeń konstrukcji zbiorników i określono przyczyny ich powstania. Dokonano analizy stosowanych materiałów do wykonywania izolacji antykorozyjnych i określono przyczyny częstych ich uszkodzeń.

Słowa kluczowe: zbiorniki żelbetowe; korozja ługująca; agresywność wody pitnej; izolacje antykorozyjne.

Abstract. The article describes the problem of the action of soft water on the reinforced concrete structures of tanks intended for storing potable water. The basis for this assessment were the results of research of reinforced concrete tanks under operation. Three tanks with a capacity of 5, 10, and 16 thousand m³ were tested. The facilities have been operated for 2, 50 and 100 years, respectively. The main purpose of the analyzes was to determine the size of selected water parameters that determine the degree of corrosion risk in concrete. Selected cases of damage to the structures of such tanks were described, with the scope of damage and the reasons for its occurrence being provided. The materials used to make anti-corrosion insulations were also analyzed, and the causes of their frequent failures were determined.

Keywords: reinforced concrete tanks; leaching corrosion; aggressiveness of potable water; anticorrosion insulations.

Problem działania korozyjnego miękkiej wody na beton jest dobrze znany [2, 3, 7], a mimo to często dochodzi do uszkodzeń korozyjnych konstrukcji zbiorników do magazynowania wody przeznaczonej do spożycia. Badania prowadzone przez autorów potwierdzają, że uszkodzenia występują zarówno w konstrukcjach realizowanych kilkadziesiąt lat temu z betonów niskich klas, jak i w konstrukcjach współczesnych realizowanych z betonów wysokich klas. Zdecydowanie najczęściej korozję betonu obserwuje się w konstrukcji stropów i górnej części ścian (powyżej zwierciadła wody). W założeniach projektowych powszechnie przyjmuje się, że woda przeznaczona do spożycia nie wykazuje korozyjnego działania na beton. Założenie takie nie jest słuszne, gdy woda jest bardzo

miękką, co w praktyce ma miejsce w obiektach wykorzystujących wodę z górskich potoków (woda roztopowa). Podkreślić jednak należy, że uszkodzenia korozyjne obserwuje się także często w zbiornikach, w których gromadzona jest twarda woda. W założeniach do projektu zbiorników nie stosuje się obiektywnych kryteriów umożliwiających ocenę potencjalnego zagrożenia korozyjnego betonu, jakie stanowi woda zgromadzona w zbiorniku.

Mechanizm uszkodzeń korozyjnych betonu

Mechanizm uszkodzeń korozyjnych betonu w zbiornikach wody przeznaczonej do spożycia opisuje reakcja wytrącania lub rozpuszczania węglanu wapnia zawartego w betonie:



Zwiększanie zawartości wolnego dwutlenku węgla w wodzie zakłóca stan równowagi i powoduje nasilenie procesów

rozpuszczania węglanu wapnia. Skutkuje to wypłukiwaniem spoiwa i odsłanianiem ziaren kruszywa, a w dalszym etapie korozją zbrojenia. Uszkodzenia takie na stropie zbiornika ilustruje fotografia 1.

W celu wstępnej oceny korozyjnych właściwości wody można wykorzystać krzywą Baylisa [1] widoczną na rysunku, która przedstawia zależność pomiędzy pH, zasadowością (CaCO₃ mg/l) i stabilnością wody. Woda nad liniami ma tendencję do tworzenia wytrącania osad-

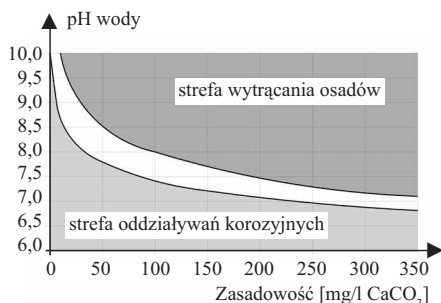


Fot. 1. Uszkodzenia stropu zbiornika nr 2 wywołane działaniem wody miękkiej

Photo 1. Damage of the roof slab of tank 2 caused by the action of soft water

¹⁾ Politechnika Wroclawska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*} Adres do korespondencji: zuzanna.fyall@pwr.edu.pl



Krzywa Baylisa [1]
Baylis curve [1]

dów (twarda woda), natomiast poniżej linii jest wodą o działaniu korozyjnym (miękka woda). Stabilna woda znajduje się w białym obszarze między liniami. Wstępnie korozyjny wpływ wody na beton można ocenić także na podstawie wyników badań twardości wody, wskaźnika pH i zawartości wolnego CO₂. Ze względu na twardość wodę dzielimy na:

- bardzo miękką – twardość ogólna 0 ÷ 1,8 mval/l (0 ÷ 5°N);
- miękką – twardość ogólna 1,8 ÷ 3,6 mval/l (5 ÷ 10°N);
- twardą – twardość ogólna 3,6 ÷ 7,2 mval/l (10 ÷ 20°N);
- bardzo twardą – twardość ogólna większa niż 7,2 mval/l (powyżej 20°N).

Natomiast ze względu na zawartość wolnego dwutlenku węgla wodę dzielimy na:

- nieagresywną – zawartość wolnego CO₂ mniejsza niż 5 mg/l;
- mało agresywną – zawartość wolnego CO₂ od 5 do 10 mg/l;
- średnio agresywną – zawartość wolnego CO₂ od 10 do 20 mg/l;
- bardzo agresywną – zawartość wolnego CO₂ powyżej 20 mg/l.

Informacje te nie są jednak wystarczające do dokładnego określenia korozyjnego wpływu wody na beton. Dodatkowo należy się posłużyć wskaźnikiem odczynu równowagi wapniowej (Indeks LSI Langeliera). Indeks ten został zdefiniowany jako odczyn wody będącej w stanie nasycenia (pH_s). Woda taka pozostaje w równowadze z wydzielonym osadem węglanu wapnia [4, 5]. W przypadku, gdy pH wody jest mniejsze od pH_s, to woda wykazuje charakter agresywny. W zależności od wielkości indeksu LSI wodę dzielimy na:

- niekorozyjną (wydziela osad) – LSI od + 2,0 do 0;
- stabilną (możliwa lekka korozja) – LSI = 0;

- korozyjną, niewytrącającą osadów – LSI od 0 do -2,0 (im mniejsza wielkość LSI, tym silniejsze działanie korozyjne wody).

Do oceny agresywności wody przydatny jest także Indeks Ryznara (RSI) [9] wyznaczany wg wzoru:

$$RSI = 2 \cdot pH_s - pH$$

W zależności od wielkości Indeksu Ryznara wodę dzielimy na:

- niekorozyjną (z bardzo silną tendencją do wytrącania osadów) – RSI < 4,0;
- niekorozyjną (z silną tendencją do wytrącania osadów) – RSI od 4,0 do 5,0;
- z lekką tendencją do tworzenia osadów – RSI od 5,0 do 6,0;
- z bardzo łagodną tendencją do tworzenia osadów (możliwa łagodna korozja) – RSI od 6,0 do 7,0;
- z wyraźną tendencją do działania korozyjnego – RSI od 7,0 do 7,5;
- silnie korozyjną – RSI od 7,5 do 9,0;
- o bardzo wysokiej agresywności – RSI > 9,0.

Określenie wielkości indeksów LSI i RSI jest niezbędne do podjęcia decyzji o ewentualnym wykonaniu kosztownych izolacji antykorozyjnych. Wykorzystanie informacji o stopniu twardości wody i wskaźniku pH może generować znaczne koszty związane z koniecznością naprawy konstrukcji, w której nie wykonano potrzebnych izolacji, lub z poniesieniem nakładów w sytuacjach, gdy wykonanie izolacji było zbędne.

Badania eksploatacyjnych obiektów

Badaniom poddano wybrane trzy betonowe zbiorniki do magazynowania wody przeznaczonej do spożycia, które były reprezentatywne dla omawianego problemu.

Wyniki badań zbiorników

The obtained test results

Nr zbiornika	pH wody		Twardość wody [°N]		Indeks LSI		Indeks RSI		Uszkodzenia konstrukcji	
	strop	ściana	strop	ściana	strop	ściana	strop	ściana	strop	ściana
1	7,2	7,0	10,0	15,0	+0,2	+0,6	6,2	6,4	lokalnie nieznaczne ślady korozji	brak uszkodzeń korozyjnych poniżej zwierciadła wody
2	6,7	7,1	4,0	16,0	-0,5	+0,4	7,7	6,3	intensywna korozja betonu na głębokość do ok. 5 mm, lokalnie korozja prętów zbrojeniovych (fotografia 1)	brak widocznej korozji betonu poniżej zwierciadła wody
3	6,8	6,6	4	3	-1,0	-1,5	7,3	8,9	korozja betonu na głębokość do 2 mm	korozja betonu na głębokość do 3 mm

Zbiornik nr 1 jest żelbetowy, prostokątny o pojemności 10000 m³, zrealizowany ok. 1930 r. (eksploatowany ponad 90 lat). Na podstawie przeprowadzonych badań nieniszczących stwierdzono, że został wykonany z betonu odpowiadającego obecnej klasie wytrzymałości C16/20. Na stropie i ścianach brak izolacji antykorozyjnych. Woda surowa pochodzi z ujęcia głębinowego.

Zbiornik nr 2 jest żelbetowy, o kołowym przekroju poprzecznym i pojemności 16000 m³, zrealizowany ok. 1975 r. (eksploatowany prawie 50 lat). Na podstawie przeprowadzonych badań nieniszczących stwierdzono, że został wykonany z betonu odpowiadającego obecnej klasie wytrzymałościowej nie niższej niż C20/25. Na stropie i ścianach brak izolacji antykorozyjnych. Woda surowa pochodzi z ujęcia głębinowego.

Zbiornik nr 3 jest żelbetowy, prostokątny o pojemności 5000 m³, eksploatowany 2 lata. Na podstawie przeprowadzonych badań nieniszczących stwierdzono, że został wykonany z betonu klasy wytrzymałościowej nie niższej niż C30/37. Na stropie i ścianach brak izolacji antykorozyjnych. Woda surowa pochodzi z ujęcia powierzchniowego (górski potok).

Podstawowym celem przeprowadzonych badań było dokładne określenie agresywności środowiska, jaka może występować wewnątrz zbiorników do magazynowania wody przeznaczonej do spożycia i związku tej agresywności z zakresem i tempem uszkodzeń korozyjnych betonu. Jako kryteria oceny agresywności środowiska przyjęto: stopień twardości i pH wody oraz indeksy LSI i RSI. W tabeli zestawiono średnie wyniki badań zbiorników z pięciu miejsc pomiarowych. W przypadku

stropów parametry dotyczą wody pobranej ze skroplin, jakie osadzają się na stropie. Podkreślić należy, że parametry tej wody charakteryzowały się znacznym zróżnicowaniem w poszczególnych fragmentach stropów.

Analiza wyników badań

Analizując otrzymane wyniki badań, szczególną uwagę należy zwrócić na zbiornik nr 2, w którym magazynowana jest woda twarda o pH powyżej 7, indeksie LSI = +0,4 i indeksie RSI = 6,3. Woda o takich parametrach jest całkowicie nieagresywna w stosunku do betonu. Na stropie tego zbiornika stwierdzono jednak intensywną korozję betonu – uszkodzenia osiągają głębokość nawet do 5 mm. Na stropie zbiornika osadzają się skropliny. Woda w skroplinach, co potwierdziły wyniki badań, jest miękka o niskim indeksie LSI i wysokim indeksie RSI. Taka woda powoduje znaczne uszkodzenia korozyjne betonu (fotografia 1). Dodatkowo korozji sprzyja fakt, że jest to zbiornik wyniesiony ponad teren, co powoduje dosyć duże wahania temperatury wewnętrznej. W połączeniu z jego mało skuteczną wentylacją, skutkuje to intensywnym skraplaniem się wilgoci na stropie. W takich warunkach następuje częsta wymiana wody zgromadzonej na stropie, co istotnie przyspiesza korozję. Stan stropu zbiornika nr 2 potwierdza duży wpływ izolacji termicznej i skutecznej wentylacji na trwałość konstrukcji stropu.

W przypadku zbiornika nr 1, wykonanego z betonu najniższej klasy i eksploatowanego ponad 90 lat, praktycznie nie stwierdzono korozji, także na stropie. Zbiornik ten jest jednak obsypany gruntem i ma skuteczną wentylację. Na stropie zbiornika tylko sporadycznie pojawiają się skropliny, a więc działanie czynnika korozyjnego występuje tylko w krótkich okresach. Dobry stan konstrukcji stropu tego zbiornika potwierdza, że w wielu przypadkach jakiegokolwiek izolacje antykorozyjne są zbędne. Aby podjąć decyzję o rezygnacji z izolacji, konieczne są jednak obiektywne kryteria oceny zagrożeń i badania tych zagrożeń.

W zbiorniku nr 3 magazynowana jest uzdatniona woda pochodząca z górskiego potoku (wody roztopowe). Jest to woda bardzo miękka. Jej indeks LSI jest bardzo

mały, a indeks RSI bardzo duży. Taka woda powoduje intensywną korozję betonu mimo jego dobrej jakości i dużej wytrzymałości. Tak szybka korozja ($2 \div 3$ mm przez 2 lata) jednoznacznie potwierdza konieczność stosowania skutecznej izolacji antykorozyjnej w zbiornikach, w których magazynowana jest miękka woda o małym indeksie LSI i dużym indeksie RSI.

Izolacje antykorozyjne w zbiornikach do magazynowania wody przeznaczonej do spożycia

Badania eksploatowanych zbiorników wskazują na konieczność szczegółowej analizy korozyjnego wpływu na beton, jakie może powodować woda przeznaczona do spożycia. Poza twardością i pH konieczne jest także określenie wielkości indeksów LSI i RSI. W przypadku potwierdzenia korozyjnych właściwości wody konieczne jest wykonanie skutecznych, całkowicie szczelnych izolacji na całej powierzchni ścian i stropu. Podkreślić należy, że gdy parametry wody nie wskazują na możliwość korozyjnego oddziaływania na beton, wykonywanie izolacji jest całkowicie zbędne. Nasze doświadczenia, wynikające z analizy stanu wielu zbiorników do magazynowania wody przeznaczonej do spożycia wskazują, że szczególnie zagrożone uszkodzeniami korozyjnymi są stropy zbiorników, nawet gdy magazynowana woda nie wykazuje żadnej agresywności w stosunku do betonu. Stan stropu typowych zbiorników po okresie $30 \div 50$ lat eksploatacji wygląda jak na fotografii 2.

Widoczne typowe uszkodzenia, to korozja powierzchniowa betonu oraz lokalnie korozja prętów zbrojeniowych, spowodowana neutralizacją zwykle zbyt cienkiej otuliny. Uszkodzenia betonu po-



Fot. 2. Powierzchnia stropu zbiornika nr 2
Photo 2. The surface of the roof slab of tank 2

wodują skropliny osadzające się na powierzchni stropu, które z reguły charakteryzują się dosyć dużą agresywnością w stosunku do betonu, co potwierdziły wyniki wykonanych badań. W przypadku gdy badania potwierdzają konieczność stosowania izolacji antykorozyjnych, bardzo istotny jest dobór odpowiedniego materiału do ich wykonania. Mogą być stosowane wyłącznie materiały spełniające wymagania określone w [6, 10] i które uzyskały pozytywną opinię Powiatowego Inspektora Sanitarnego [8].

W celu zabezpieczenia powierzchni betonowych zbiorników przed korozją ługującą wykonuje się powłoki:

- elastyczne z mineralnych materiałów modyfikowanych tworzywami sztucznymi;
- sztywne z materiałów mineralnych;
- z tworzyw sztucznych, najczęściej z żywic epoksydowych i polimocznikowych.

Badania eksploatowanych zbiorników, w których wykonano powłoki antykorozyjne na etapie ich realizacji lub w trakcie remontu, wskazują, że wady występują najczęściej w przypadku powłok elastycznych z materiałów mineralnych. W takich powłokach obserwuje się często rozpuszczanie tworzywa, co powoduje uszkodzenia struktury powłoki, osłabienie przyczepności do podłoża i ciemne przebarwienia. Wyniki badań wytrzymałości powłok na odrywanie wskazują, że dosyć często, po krótkim okresie eksploatacji, dochodzi do zmniejszenia przyczepności powłok do podłoża nawet o więcej niż 50%. Wadą elastycznych powłok mineralnych jest także ich bardzo mała dyfuzyjność (często są to powłoki niedyfuzyjne). Odporność na korozję ługującą poszczególnych elastycznych materiałów mineralnych jest zróżnicowana. Należy rozważać ich stosowanie tylko w szczególnie uzasadnionych przypadkach, takich jak konieczność nałożenia na zarysowane podłoże o zmiennej szerokości rozwarcia rys.

Dużo trwalsze są powłoki sztywne wykonywane z materiałów mineralnych, ale pod warunkiem, że producent deklaruje w karcie technicznej wyrobu jego odporność na korozję ługującą. W SIWZ zawsze należy określić cechy środowiska, na jakie narażona będzie powłoka antykorozyjna. Z całą pewnością należy przyjąć, że skropliny na stro-



ARBOCEL – The Power of Progress

– włókna na bazie celulozy o charakterze mikrobrojającym, zagęszczającym oraz strukturotwórczym w produktach chemii budowlanej

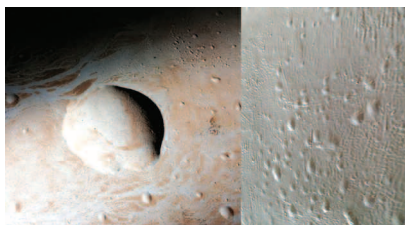


Rettenmaier Polska
Sp. z o.o.
Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B
02-366 Warszawa
mobile +48 600 423 423
Tel + 48 22 608 51 00
e-mail: arbocel@jrs.pl

pach będą tworzyły, przynajmniej okresowo, środowisko silnie agresywne w stosunku do betonu (twardość wody ok. 3°N, indeks LSI do -1,5, a indeks RSI nawet do ok. 9,0). Często popełnianym błędem jest nakładanie zbyt cienkich powłok. Powłoki sztywne z materiałów mineralnych nie powinny mieć grubości mniejszej od 6 mm. Dużą zaletą sztywnych powłok mineralnych jest ich dyfuzyjność, co umożliwia nakładanie na wilgotne podłoże.

Powłoki antykorozyjne z żywicy syntetycznych wykazują liczne zalety, szczególnie powłoki z żywicy polimocznikowych. Powłoki te mają bardzo dobrą przyczepność do podłoża betonowego. Ponadto są elastyczne, co umożliwia ich nakładanie na zarysowane podłoże, zapewniają pełną szczelność i są odporne na agresję chemiczną oraz na uszkodzenia mechaniczne. Ich wykonanie wymaga jednak rygorystycznego przestrzegania reżimów technologicznych wskazanych przez producenta, szczególnie dotyczących wilgotności podłoża. Ponadto podłoże powinno być równe, co zwykle wymaga nałożenia warstwy szpachłówki mineralnej. Powłoki z żywicy są całkowicie niedyfuzyjne, co w przypadku ich nałożenia na zbyt wilgotne podłoże skutkuje odspojeniami (fotografia 3).

Liczne ekspertyzy potwierdzają, że wykonanie powłoki polimocznikowej niewykazującej wad jest bardzo trudne. Podstawowym problemem jest osuszenie betonu do wilgotności nie większej od 4% (w całej masie, a nie tylko w strefach przypowierzchniowych). W przypadku nałożenia powłoki na zbyt wilgotne podłoże, ciśnienie dyfuzyjne spowoduje odspojenia powłoki (fotografia 3), nawet gdy jej przyczepność do podłoża, potwierdzona wynikami badań odbiorowych, była bardzo wysoka.



Fot. 3. Powłoka z żywicy polimocznikowej nałożona na zbyt wilgotne podłoże
Photo 3. Polyurea resin coating applied to a concrete surface that was too wet

Podsumowanie

Wyniki wykonanych badań zbiorników potwierdziły, że do podjęcia decyzji o konieczności wykonania izolacji antykorozyjnych niezbędne jest wykonanie badań parametrów wody i skroplin na stropie zbiornika. Tylko na podstawie wyników tych badań możliwa jest dokładna ocena występujących zagrożeń. Konieczne jest określenie twardości wody i pH oraz Indeksu LSI i Indeksu RSI.

Zdecydowanie najmniej wad, co potwierdzają wyniki badań eksploatowanych zbiorników, wykazują sztywne powłoki antykorozyjne wykonane z materiałów mineralnych o potwierdzonej odporności na korozję ługującą.

Badania eksploatowanych zbiorników potwierdzają duży wpływ izolacji termicznej i skutecznej wentylacji na trwałość zbiorników, wynikającą z ograniczenia możliwości częstego skraplania się wody na powierzchni stropu wewnątrz zbiornika.

Fotografie: archiwum autorów

Literatura

- [1] Baylis J. 1935. „Treatment of water to prevent corrosion”. *Journal of the American Water Works Association* 29 (2): 220 – 234.
- [2] Carde C., R. Francois, J. Torrenti. 1996. „Leaching of both calcium hydroxide and C-S-H from cement paste: modelling the mechanical behaviour”. *Cement and Concrete Research* 26 (8): 1257 – 1268.
- [3] Greve-Dierfeld S., Y. Schiegg, F. Hunkeler. 2019. *Investigations of corrosion due to calcium leaching*. Conference: RILEM SMSS Spring convention.
- [4] Langelier W. F. 1946. „Chemical equilibria in water treatment”. *Journal of the American Water Works Association*, Volume 38: 169 – 178.
- [5] Lutomińska M., Sz. Lutomiński. 2014. „Comparison of Damage Due to Corrosion for Reinforced Concrete Tanks for Raw and Treated Water”, *Procedia Engineering*, Volume 91, pp. 244 – 249.
- [6] PN-EN 805 Zaopatrzenie w wodę – Wymagania dotyczące systemów zewnętrznych i ich części składowych.
- [7] Orlikowski J., A. Zielinski, K. Darowicki, S. Krakowiak, K. Zakowski, P. Slepski, A. Jazdzewska, M. Gruszka, J. Banasc. 2016. „Research on causes of corrosion in the municipal water supply system”. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 4, pp. 108 – 115.
- [8] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U., 2017 r., poz. 2294).
- [9] Ryznar J. W. 1944., „A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water.” *Journal of the American Water Works Association*, Volume 36, pp. 472 – 486.
- [10] Ustawa z 7 czerwca 2001 roku (Dz.U. nr 72, poz. 747) o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków.

Przyjęto do druku: 10.01.2022 r.