

Marcin MIDRO*

Politechnika Krakowska

WPLYW KOROZJI NA TRWAŁOŚĆ PRZEMYSŁOWYCH KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH

Streszczenie. Artykuł jest poświęcony zagadnieniom związanym z trwałością konstrukcji żelbetowych eksploatowanych w warunkach wysokiej wilgotności i temperatury. Opisano przyczyny i procesy degradacji elementów konstrukcji, wpływające na obniżenie nośności przekrojów. W szczególności przedstawiono mechanizmy inkubacji i propagacji korozji zbrojenia oraz karbonatyzacji betonu. Na podstawie szczegółowych opisów uwzględnionych zjawisk stworzono model analizy trwałości konstrukcji. Model umożliwia szacowanie okresu użytkowania obiektu oraz określanie sposobów postępowania w trakcie jego eksploatacji.

CORROSION INFLUENCE ON THE DURABILITY OF INDUSTRIAL REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS

Summary. The paper is focused on the issues of durability of RC structures exposed to the conditions of high humidity and temperature. Details of degradation causes and processes which are subjected to the unfavorable environmental conditions diminishing load-capacities of RC construction sections are discussed. In particular, description of the mechanisms of incubation and propagation of armature corrosion and concrete carbonation is given. On the basis of detailed descriptions of the phenomena considered the model for the construction durability analysis was created. The model enables to estimate the service life of the structure.

1. Trwałość konstrukcji

Trwałość konstrukcji to jej zdolność do spełniania przez określony czas wymagań użytkownika, w warunkach oddziaływania określonych czynników, bez wyraźnego obniżenia właściwości użytkowych lub wystąpienia nadmiernych kosztów. Należy zatem tak projektować obiekty, aby spełniały wymagania w założonym czasie użytkowania. Jednakże czas użytkowania konstrukcji jest ograniczony przez:

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. Politechniki Krakowskiej.

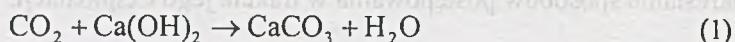
- dyfuzję agresywnych substancji powodujących korozję,
- reakcje chemiczne substancji pochodzących ze środowiska,
- proces cyklicznego zamarzania i odmrażania, który powoduje zarysowanie betonu.

Proces niszczenia konstrukcji, w wyniku oddziaływania na nią otaczającego środowiska, można podzielić na dwa etapy:

Okres inkubacji, w którym zbrojenie jest chronione przez beton i nie występuje praktycznie jego niszczenie.

Okres propagacji, czyli okres korozji zbrojenia, którego początkiem jest depasywacja warstwy ochronnej zbrojenia. Warstwa pasywna zbrojenia składa się z tlenków żelaza Fe_3O_4 , a jej grubość wynosi 1÷5 nm. Depasywacja warstwy ochronnej następuje w wyniku obniżenia pH betonowej otuliny zbrojenia.

Najczęściej niszczenie konstrukcji żelbetowej znajdującej się w środowisku gazowym spowodowane jest korozją zbrojenia w wyniku karbonatyzacji. Karbonatyzacja to reakcja dwutlenku węgla wnikającego przez pory w betonie z wodorotlenkiem wapnia, składnika stwardniałego zaczynu cementowego:



W wyniku reakcji następuje obniżenie wskaźnika pH z początkowego poziomu wynoszącego 12,60 do 8,30. Zobojętnienie przebiega od powierzchni elementu w głąb wyraźnym frontem. Gdy front karbonatyzacji osiąga poziom zbrojenia, następuje uszkodzenie warstwy pasywnej i wtedy można mówić o początku zjawiska korozji.

2. Model teoretyczny

W modelu jak w teorii, aby oszacować czas użytkowania konstrukcji należy wyznaczyć okres inkubacji i okres propagacji. Proces karbonatyzacji, a dokładniej przekształcenie wzoru na szybkość karbonatyzacji, pozwala obliczyć czas inkubacji:

$$t = \left(\frac{x}{K} \right)^2 \quad (2)$$

w którym:

x – grubość warstwy zobojętnionej, mm;

t – czas inkubacji, w latach;

K – współczynnik zależny od zmiennych opisanych poniżej, w mm/lata^{0,5}:

$$K = \gamma \cdot k \cdot f_{(HR)} \quad (3)$$

gdzie: $f_{(HR)}$ – współczynnik związany z wilgotnością względną powietrza HR:

$$f_{(HR)} = -3,5833 \cdot HR^2 + 3,4833 \cdot HR + 0,2 \quad (4)$$

k – współczynnik transportu zależny od wytrzymałości betonu na ściskanie:

$$k = \sqrt{365} \cdot \left(\frac{1}{2,1 \sqrt{f_{ck}}} - 0,06 \right) \quad (5)$$

γ – współczynnik wyznaczany eksperymentalnie, o wartościach: 0,9, 1,2, 1,5.

W niniejszym artykule czas propagacji obliczono na podstawie modelu Morinaga. Ta empiryczna metoda pokazuje związek między czasem propagacji a masą produktów korozji przypadającą na powierzchnię pręta. Czas propagacji opisano wzorem:

$$t_{cor} = \frac{Q_{cr}}{J_r} \quad (6)$$

w którym:

Q_{cr} – masa produktów korozji przypadającej na powierzchnię pręta, g/mm²;

J_r – szybkość korozji, g/mm²s.

Parametry powyższej formuły wyznacza się następująco:

Masa produktów korozji:

$$Q_{cr} = 0,602 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot C_v}{D} \right)^{0,85} \cdot D \quad (7)$$

gdzie: C_v – grubość otuliny, w mm;

D – średnica pręta, w mm.

Szybkość korozji:

$$J_r = \frac{M}{n F} i_{cor} \quad (8)$$

gdzie: M – masa molowa, g/mol, $M = 55,85$ g/mol;

n – wartościowość, $n = 2$ dla Fe^{2+} ;

i_{cor} – gęstość prądu korozji, A/cm²;

F – stała Faradaya, $F = 96487$ C.

Do pokazania relacji między procesem korozji zbrojenia a zmniejszeniem nośności konstrukcji zastosowano formuły obliczeń oparte na prawie Faradaya, opracowane przez PHIMECA. Obliczenia przeprowadzono dla różnych i_{cor} . Według PHIMECA, zmiana przekroju pojedynczego pręta zbrojenia jest funkcją czasu:

$$\Delta \varphi_i(t) = \alpha \cdot \lambda \cdot i_{cor} \cdot t \quad (9)$$

gdzie: α – współczynnik intensyfikacji korozji, $\alpha = 2,0$ dla korozji całego elementu;

λ – średnia prędkość korozji, przyjęto $\lambda = 0,0116$ mm/rok;

t – czas, w latach;

i_{cor} – gęstość prądu korozji, A/cm².

3. Zastosowanie modelu dla obiektu przemysłowego

Przedstawione wzory na czas inkubacji i propagacji posłużą do określenia czasu użytkowania istniejącej konstrukcji. Przedmiotem analizy jest żelbetowy ruszt chłodni kominowej, wzniesionej na początku lat 80. we Francji. Stanowi on konstrukcję nośną dla urządzeń rozpraszających chłodzoną wodę.

3.1. Geometria obiektu

Schematem statycznym konstrukcji jest ruszt belkowy. Ruszt jest konstrukcją statycznie wyznaczalną, składającą się z belek głównych, pośrednich i drugorzędnych. W osiach głównych układu konstrukcji występują naprzemiennie belki główne oraz wsparte na nich przegubowo belki pośrednie, tworząc układ gerberowski. Belki drugorzędne oparte są na belkach głównych i pośrednich w kierunku prostopadłym. Według projektu, żelbetowe belki rusztu zostały wykonane z betonu o wytrzymałości na ściskanie równej 27 MPa oraz zbrojenia o granicy plastyczności 400 MPa.



Rys. 1. Schemat konstrukcji rusztu

Fig. 1. Grid scheme

Analizie poddano trzy belki, po jednej dla belek głównych, pośrednich oraz drugorzędnych. W dalszych obliczeniach wybrane belki będą stanowić reprezentację całej konstrukcji. Belka główna to belka o kształcie teowym, długości 10,00 m. Pole przekroju poprzecznego belki głównej wynosi $\Omega_0 = 0,235 \text{ m}^2$, a wysokość $h = 0,95 \text{ m}$. Belka pośrednia to belka o długości 6,86 m. Kształt, pole przekroju oraz wysokość belki pośredniej są identyczne jak dla belki głównej. Belka drugorzędna to belka o kształcie trapezowym, długości 7,64 m. Pole przekroju poprzecznego belki drugorzędnej wynosi $\Omega_0 = 0,124 \text{ m}^2$, a wysokość $h = 0,75 \text{ m}$.

3.2. Warunki eksploatacji konstrukcji

Elementy rusztu narażone są na działanie niekorzystnych warunków środowiskowych, jakimi są: temperatura powietrza wewnątrz obiektu, w zakresie od temperatur ujemnych do +35 °C, oraz wilgotność względna powietrza powyżej 85%.

3.3. Obciążenia

Belki drugorzędne przenoszą obciążenia od ciężaru własnego, a także ciężaru podwieszonego zraszalnika. Dodatkowe obciążenie dla belek drugorzędnych stanowią orurowanie z wodą oraz separatory spoczywające na belkach.

Belki pośrednie oparte są na wspornikach czołowych belek głównych. Przenoszą one obciążenia od ciężaru własnego, przejmują obciążenia od belek drugorzędnych, a ponadto obciążenia od podwieszonego do nich zraszalnika.

Belki główne oparte są na słupach. Przenoszą one obciążenia od ciężaru własnego, przejmują obciążenia od belek drugorzędnych i pośrednich, a ponadto obciążenia od podwieszonego do nich zraszalnika.

Wymienione rodzaje obciążeń zalicza się do obciążeń stałych. Dodatkowymi obciążeniami konstrukcji są lód i osad traktowane jako obciążenia zmienne o określonej wartości. Jednak w ciągu kolejnych lat eksploatacji obiektu zauważono silny wzrost ciężaru osadu na powierzchni zraszalnika. Funkcja ciągła, powstała przez aproksymację wartości corocznych pomiarów osadu, ma postać:

$$y = 3,4859e^{0,2462x} \quad (10)$$

3.4. Analiza zmiennej nośności

W celu sprawdzenia wyężenia zginanych elementów konstrukcji w przekrojach miarodajnych, zastosowano kombinację obciążeń krótkotrwałych. Dla belek określono odpowiednie rezerwy bezpieczeństwa bez uwzględnienia spadku nośności oraz wzrostu obciążeń, czyli dla początku eksploatacji. Nośność w przekrojach miarodajnych dla belek drugorzędnych i pośrednich jest spełniona, natomiast nośność obliczeniowa jest przekroczona dla belki głównej w przekroju podporowym.

W analizie rzeczywistego wyężenia konstrukcji przekrój ten jest przekrojem krytycznym, ograniczającym czas użytkowania dla całej konstrukcji.

Czas inkubacji

Do obliczenia czasu inkubacji wykorzystano wzór (2) na głębokość karbonatyzacji betonu. W tabeli 1 zaprezentowano wartości czasu inkubacji w zależności od grubości

otuliny i możliwych wartości wilgotności względnej powietrza. Dwie wartości: 85% oraz 90% względnej wilgotności powietrza, zostały dodatkowo oznaczone, gdyż odpowiadają warunkom panującym wewnątrz opisanego obiektu. Do dalszej analizy przyjęto czas inkubacji odpowiednio: 30 lat dla strzemion i 40 lat dla zbrojenia głównego, czyli czas dla powyższych wartości względnej wilgotności powietrza.

Tabela 1
Zależność czasu inkubacji od grubości otulenia i wilgotności względnej powietrza

Głębokość c [mm]	Czas inkubacji [lata]				
	Wilgotność względna				
	75%	80%	85%	90%	95%
Pręty główne (c = 30 mm)	13,1	17,4	25,5	44,5	110
Strzemiona (c = 38 mm)	21,1	27,8	40,9	71,5	176,5

Czas propagacji według modelu Morinaga

Czas propagacji jest czasem od zubożenia warstwy otulenia zbrojenia do pierwszego zarysowania powierzchni betonu w wyniku procesu korozji. Czas ten zależy od szybkości korozji, zależnej od agresywności środowiska. Wyższa wartość i_{cor} przyspiesza proces korozji. Gęstość prądu korozji $i_{corMax} = 1,0 \mu A/cm^2$ odpowiada środowisku agresywnemu, a $i_{corMin} = 0,2 \mu A/cm^2$ środowisku małoagresywnemu.

Tabela 2
Zależność czasu propagacji od średnicy pręta oraz gęstości prądu korozji

Średnica pręta	Czas propagacji [lata]		
	i_{corMax}	i_{corMed}	i_{corMin}
	$1 \mu A/cm^2$	$0,5 \mu A/cm^2$	$0,2 \mu A/cm^2$
Ø8 mm	3,3	6,6	16,4
Ø12 mm	4,3	8,7	21,7
Ø16 mm	4,7	9,4	23,5
Ø20 mm	5	10,1	25,2

Nośność na zginanie w czasie procesu korozji

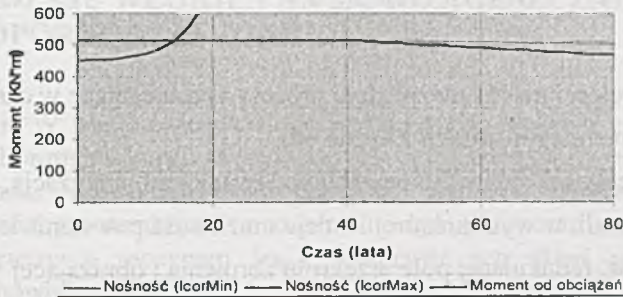
Według PHIMECA, zmiana przekroju pojedynczego pręta zbrojenia jest funkcją czasu. Wraz ze zmianą przekroju pojedynczego pręta zbrojenia można określić zmianę pola przekroju zbrojenia w czasie. Idąc dalej, można wyznaczyć przebieg nośności elementu M_R w czasie propagacji.

3.5. Analiza symulacyjna wyteżenia

W celu przeanalizowania zmiennej rezerwy bezpieczeństwa belki głównej w przekroju podporowym, zestawiono moment zginający, z uwzględnieniem wzrostu

obciążeń od ciężaru osadu, ze zmianą nośności przekroju w czasie. Sporządzone zestawienie posłuży do oszacowania przybliżonego okresu użytkowania konstrukcji.

Jak widać na rys. 2, nośność zostanie osiągnięta w przekroju podporowym belki głównej w czasie ok. 14,1 roku od rozpoczęcia eksploatacji. Ponieważ wiek konstrukcji w chwili zniszczenia przekroju podporowego belki głównej jest najkrótszy, przyjmuje się, że jest on przekrojem krytycznym dla całej konstrukcji.

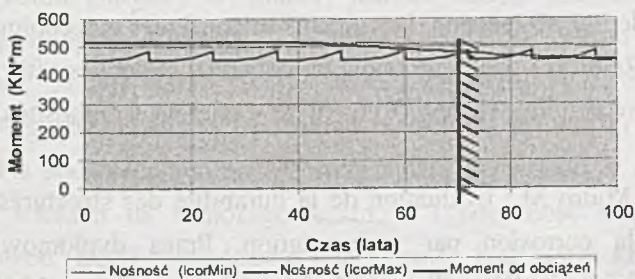


Rys. 2. Przebieg zmian nośności i momentu zginającego dla przekroju podporowego belki głównej
Fig. 2. Time function of load bearing capacity of the cross-section and of bending moment

Istnieje możliwość przedłużenia okresu użytkowania konstrukcji. Istotne jest jednak znalezienie sposobu na opóźnienie chwili, w której linie teoretyczne momentów od obciążeń oraz nośności się przetną. Zgodnie z przedstawionymi poniżej strategiami, prace, które przedłużają czas eksploatacji, sprowadzają się do wzmacniania elementów oraz wymiany lub czyszczenia zraszalnika:

1. Wymiana zraszalnika w regularnych, krótszych odstępach czasu (co 12 lat).
2. Wzmacnianie konstrukcji w początkowym etapie eksploatacji, w celu zwiększenia nośności, i wymiana zraszalnika w dłuższych odstępach czasu.
3. Wymiana zraszalnika co 14 lat i wzmacnianie konstrukcji, kiedy jest to konieczne.

Spśród możliwych rozwiązań wybrano pierwszą strategię użytkowania obiektu.



Rys. 3. Wykres pracy belki głównej nad podporą, dla konserwacji co 12 lat

Fig. 3. Comparative diagram of bending moment and load bearing capacity for the principal beam in the support cross-section (strategy 1)

Jak wynika z analizy przy użyciu opracowanego modelu, wybrane rozwiązanie pozwala bezawaryjnie użytkować konstrukcję przez 70 lat, jeśli zraszalnik wymieniano cyklicznie co 12 lat. Po okresie 70 lat należy wybrać jedno z rozwiązań:

- gruntowna naprawa, związana z wymianą elementów konstrukcji,
- zburzenie całej konstrukcji i wybudowanie nowej, używanej kolejne kilkadziesiąt lat.

4. Wnioski

W analizie trwałości należy uwzględnić procesy przebiegające w czasie:

1. Niszczenie elementu konstrukcji zależne od:

- zmiany właściwości otuliny betonu spowodowane karbonatyzacją,
- depasywacji stali, w wyniku której istnieje możliwość powstania korozji,
- korozji prętów, redukującej pole przekroju zbrojenia i obniżającej wytrzymałość.

2. Wzrost obciążenia.

Kompleksowa analiza zjawisk pozwala określić zmienny w czasie zapas bezpieczeństwa i wyznaczyć przekrój krytyczny, w którym zniszczenie teoretycznie wystąpi najwcześniej. Dzięki wykorzystaniu zwięzłych algorytmów można:

- przewidzieć okres użytkowania, wyznaczyć czas bezawaryjnej pracy konstrukcji,
- określać częstotliwość inspekcji sprawdzających poprawną pracę konstrukcji,
- określić strategię użytkowania, czyli terminarz napraw lub wymiany elementów.

BIBLIOGRAFIA

1. Ściślewski Z., Trwałość konstrukcji żelbetowych. Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 1995.
2. Association Française de Génie Civil, Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali reaction. Documents scientifiques et techniques, 2004.
3. Ahmad S.: Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review. Cement & Concrete Composites, No. 25, 2003, p. 459-471.
4. Sagastuy O., Midro M.: Évaluation de la durabilité des structures en béton armé exposées à la corrosion par carbonatation. Praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, Université Blaise Pascal, Kraków-Clermont-Ferrand 2006.