

**XXIV**XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009**awarie budowlane**

Dr inż. JANUSZ KUBIAK
Dr inż. ALEKSY ŁODO
Dr inż. JAROSŁAW MICHAŁEK
Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

BADANIA WPLYWU ŚRODOWISKA CHLORKOWEGO NA TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI ŻELBETOWEJ HALI PRZEMYSŁOWEJ

INVESTIGATIONS OF CHLORIDE BACKGROUND ON DURABILITY OF RC CONSTRUCTION OF INDUSTRIAL HALL

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań zawartości chlorków w otulinie zbrojenia żelbetowych i sprężonych elementów prefabrykowanej konstrukcji hali odlewni aluminium. Opisano sposób doboru funkcji dyfuzji chlorków w betonie (wynikających z prawa Ficka) aproksymujących wyniki badań doświadczalnych. Na podstawie dobranych funkcji określono okresy trwałości głównych elementów konstrukcyjnych hali eksploatowanej w środowisku chlorkowym.

Abstract. In the paper the results of investigations of the chloride content of a concrete covering of reinforced and prestressed concrete elements of the aluminum-casting factory structure are presented. The method of the selection of chloride diffusion function in concrete (on the basis of Fick law) was described. The theoretical curves approximate the experimental curves. On the basis of the selected functions the durability of the main structural elements of industrial hall in chloride background was estimated.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach coraz więcej obiektów żelbetowych i sprężonych wykazuje różnorodne uszkodzenia wywołane zanieczyszczeniem środowiska i wymaga naprawy lub remontu [1, 2, 4, 5, 6]. Uszkodzenia konstrukcji z betonu mogą być spowodowane czynnikami chemicznymi (agresywne oddziaływanie kwasów, siarczanów, chlorków, wód miękkich, dwutlenku węgla, soli amonowych i magnezowych oraz substancji ropopochodnych) lub mechanicznymi (nadmierne deformacje, rysy, pęknięcia, ubytki i łuszczenie się betonu wywołane wyjątkowymi obciążeniami statycznymi lub dynamicznymi albo lokalnymi przeciążeniami). Według różnych analiz przeprowadzonych w Polsce i innych krajach europejskich oraz USA [2] pierwotnymi przyczynami uszkodzeń konstrukcji są błędy projektowe (40%) i wykonawcze (40%) oraz zła jakość materiałów (20%). Błędy projektowe i wykonawcze w przypadku korozji chemicznej wynikają głównie z braku odpowiednich danych dotyczących zjawisk zachodzących w przyszłym obiekcie przemysłowym [13, 14] oraz nie do końca sprecyzowanych przepisów dotyczących zasad projektowania konstrukcji na okres użytkowania (odpowiednia norma jest aktualnie w opracowywaniu [7]).

Jeżeli szkodliwe substancje chemiczne wnikną w głąb betonu, to za krytyczny parametr eksploatacji obiektu z betonu przyjmuje się czas przebiccia chemicznego t_{ch} [4] tych substancji do stali zbrojeniowej w ilości wywołującej korozję zbrojenia (czas t_{ch} można nazwać rzeczywistym okresem użytkowania konstrukcji). Jeżeli czas t_{ch} jest dłuższy od projektowanego okresu użytkowania t_u , to uznaje się że konstrukcja jest bezpieczna przez cały okres użytkowania t_u . W przypadku $t_{ch} < t_u$, można wydłużyć okres t_{ch} użytkowania obiektu przez zastosowanie ochrony powierzchniowej betonu albo zmianę warunków środowiskowych w obrębie eksploatowanej konstrukcji. W obiekcie przemysłowym właściwie zaprojektowanym i eksploatowanym zgodnie z przeznaczeniem otulina betonowa powinna skutecznie chronić w czasie t_u zbrojenie zwykle i sprężające przed korozją.

Chlorki zawarte w środowisku użytkowania konstrukcji z betonu są bardzo niebezpiecznym czynnikiem korozji, ponieważ w warunkach wilgotnych szybko przenikają do wnętrza betonu i w chwili gdy ich stężenie osiągnie przy zbrojeniu wartość krytyczną rozpoczyna się proces korozji stali. W pracach [2, 3, 5, 6] podano, że o przedziale czasu od wystąpienia czynnika skażenia betonu jonami Cl^- do zapoczątkowania korozji stali decydują głównie takie czynniki jak: koncentracja chlorków na powierzchni betonu, zawartość wolnych jonów chlorkowych w betonie oraz szybkość ich penetracji w głąb otuliny, zależna przede wszystkim od wilgotności betonu.

Niszczące działanie jonów chlorkowych Cl^- w stosunku do konstrukcji żelbetowych i sprężonych polega głównie na neutralizacji (zobojętnieniu) ochronnych właściwości warstwy pasywacyjnej powstającej na powierzchni stali zbrojeniowej [2, 3, 5, 6]. Pasywacja stali zbrojeniowej i sprężającej zachodząca w środowisku alkalicznym betonu polega na tworzeniu się na jej powierzchni tlenku żelaza, wodorotlenku żelazowego i tzw. getytu chroniącego stal przed korozją. Nawet częściowe zniszczenie tej warstwy przez chlorki (zamiana wodorotlenku żelazowego na chlorek żelazowy) powoduje tzw. aktywację stali (stal staje się podatna na korozję nawet przy $pH > 9,0$). W pracy [3] stwierdzono, że o postępie korozji chlorkowej w konstrukcjach żelbetowych decyduje głównie tzw. próg korozji (wartość krytycznego stężenia jonów chlorkowych przy stali C_{lim}) i kinetyka procesu korozji (migracja jonów chlorkowych w głąb betonu charakteryzowana współczynnikiem dyfuzji D_a). Ze zjawiskiem potencjalnej korozji chlorkowej mamy do czynienia w opisanym niżej pięcioletnim budynku żelbetowym odlewni aluminium, w którym występuje nietypowe środowisko chlorkowe wywołane procesami produkcyjnymi.

2. Opis budynku odlewni aluminium i procesów w nim zachodzących

Budynek odlewni aluminium jest trójnawową (3×22,5 m), żelbetową halą prefabrykowaną o układzie konstrukcyjnym słupowo-ryglowym [13, 14]. Przekrycie hali stanowią płyty strunobetonowe TT-62 o rozpiętości 14,75 m oparte na dwuspadowych dźwigarach strunobetonowych o rozpiętości 22,5 m. Konstrukcja dachu hali wsparta jest na słupach żelbetowych o wysokości 10,0 m i przekroju 0,6×0,6 m, osadzonych w kielichowych stopach fundamentowych. Obudowę hali stanowią prefabrykowane, nieocieplone płyty żelbetowe grubości 14 cm oparte na wspornikach słupów. Wyposażenie ścian (ramy okienne, nawietrzniki powietrza, drzwi i wrota) wykonane jest ze stali ocynkowanej i zabezpieczonej antykorozyjnie farbami. Obrótowe wywietrzniki dachowe wykonano ze stali nierdzewnej, ale nieodpornej na korozję chlorkową [14].

W przedmiotowej hali wykonywane są odlewy aluminiowe cylindrów do silników samochodowych. W tej samej hali odbywają się procesy uzyskiwania ciekłego stopu aluminium w piecach gazowych i indukcyjnych oraz proces oczyszczania stopu gazowym chlorem.

Nad stanowiskami oczyszczania ciekłego stopu aluminium brak jest instalacji wychwytyjących przynajmniej część ulatniających się związków gazowych (chlorek glinu, chlor i inne jego związki). Związki te wraz z pyłami technologicznymi unoszą się pod konstrukcję stropodachu oraz w kierunku ścian zewnętrznych i wrót hali. Osadzają się one na elementach konstrukcyjnych lub przyklejają do zimnych i wilgotnych powierzchni konstrukcji, tworząc potencjalne źródło zagrożenia korozyjnego żelbetowych i sprężonych elementów konstrukcji hali oraz jej stalowego wyposażenia.

W dokumentacji projektowej hali odlewni aluminium przyjęto klasę ekspozycji środowiska wewnętrznego XD1, która według norm [15, 16] występuje w pomieszczeniach o umiarkowanej wilgotności, przy oddziaływaniu na powierzchnię betonu chlorków z powietrza. Według przepisów powyższych norm dla konstrukcji żelbetowych i sprężonych znajdujących się w środowisku XD1 maksymalny stosunek $w/c = 0,55$, a minimalna masa cementu w betonie powinna wynosić $m_c \geq 300 \text{ kg/m}^3$. Przy założeniu 50-letniego okresu trwałości konstrukcji żelbetowej minimalna grubość otuliny zbrojenia zwykłego ma wynosić $c_{min} = 40 \text{ mm}$, a dopuszczalne szerokości rozwarcia rys $w_{lim} = 0,2 \text{ mm}$ [16]. Dla konstrukcji strunobetonowych wymaga się braku rozciągania w obszarze 25 mm od cięgien i grubości otuliny betonowej $c_{min} = 50 \text{ mm}$.

W świetle wymagań normy [16] przedmiotowa konstrukcja hali odlewni aluminium spełnia wymagania (po wykonaniu napraw i wzmocnień stref przypodporowych dźwigarów dachowych [8]) nie tylko klasy ekspozycji środowiska XD1, ale również klas XD2 i XD3. Wymagania normy [16] odnośnie minimalnych grubości otulin i szerokości rozwarcia rys są takie same dla wszystkich trzech klas XD, a beton spełnia wymóg $w/c < 0,45$ i zawiera minimum 320 kg cementu w 1 m^3 betonu [14].

Badania pyłów pobranych w 2007 r. z elementów konstrukcji hali zlokalizowanych nad stanowiskiem oczyszczania stopu aluminium gazowym chlorem wykazały w analizie spektralnej zawartość jonów Cl^- na poziomie 20,4%, a w analizie wyciągów wodnych 19,7% [9, 13] (czyli prawie wszystkie chlorki zawarte w pyłach przeszły do roztworu). O zagrożeniu, jakim mogą być związki chloru zawarte w pyłach dla konstrukcji po ich uwodnieniu można się było przekonać w lipcu 2008 r. podczas przerwy remontowej, kiedy w hali zatrzymano całkowicie produkcję (wygaszono piece i wystudzono kadzie z ciekłym stopem). Po kilku dniach „przewietrzania” hali w celu szybszego obniżenia temperatury urządzeń technologicznych wystąpiło zjawisko wykraplania się wody na zimnych elementach konstrukcyjnych (w warunkach wykorzystywania pełnych mocy produkcyjnych pod dachem hali jest temperatura $+25 \div 30^\circ\text{C}$ a wilgotność względna powietrza nie przekracza 25% [13]). Na posadzce hali wzdłuż żeber płyt dachowych i dźwigarów pojawiły się ślady ciemnobrązowych kropeł spadającego płynu. Badania wykazały, że ciemnobrązowa maź zebrana z powierzchni elementów konstrukcji dachu zawiera około 13% jonów Cl^- [14].

Zjawisko wykraplania się wody na zimnej konstrukcji dachu wystąpiło na skutek dostawania się do wnętrza hali przesyconego wilgocią powietrza zewnętrznego. Na powierzchniach betonowych pokrytych pyłami wykraplała się woda i rozpuszczając zawarte w pyłach chlorki gromadziła się w postaci kropeł na dolnych krawędziach żeber płyt dachowych i dźwigarów. Część wody z rozpuszczonymi chlorkami wniknęła w wysuszoną powierzchnię betonu, stając się źródłem zanieczyszczeń betonu chlorkami. W zaistniałej sytuacji w hali wystąpiła klasa ekspozycji XD3 opisywana w normach [15,16] jako środowisko cyklicznie mokre i suche. W świetle zapisów normy [17] (tabl. A.1 Zał. A) wysoka agresywność środowiska (klasa ekspozycji XD1) przeszła w agresywność ekstremalną (klasa ekspozycji XD3) i stąd tak ważną jest kwestia oceny trwałości konstrukcji obiektu halowego z betonu eksploatowanego w tak nietypowym środowisku chlorkowym.

3. Pomiar zawartości chlorków w otulinie betonowej zbrojenia

W ocenie trwałości konstrukcji żelbetowych i sprężonych eksploatowanych w środowisku chlorkowym istotna jest głębokość penetracji chlorków w głąb otuliny zbrojenia, wykonana na podstawie badań rozdrobnionego betonu. Uproszczony sposób pobierania rozdrobnionego betonu (proszku betonowego) z różnych głębokości elementów polega na nawiercaniu otworów w betonie [13]. Uzyskane w ten sposób próbki proszku betonowego należy przechowywać w szczelnie zamkniętych naczyniach, celem zabezpieczenia ich przed zmianą składu chemicznego i wilgotności. Niedokładność tego sposobu pobierania próbek polega na częściowym mieszanii się proszku betonowego z różnych głębokości (boczne rozwieranie otworu i przybliżona ocena jego głębokości).

Badania kontrolne [13, 14] zawartości chlorków w proszku betonowym z nawierceń wykonywano przy użyciu zestawu Rapid Chloride Test [9,10]. Pomiar polegał na włożeniu elektrody do fiolki z roztworem pyłu betonowego (w płynie ekstrakcyjnym) i odczytaniu z ekranu minikomputera napięcia prądu przepływającego przez roztwór, odpowiadającego stężeniu jonów Cl^- .

W celu dokładnego określenia zawartości chlorków na różnych głębokościach otuliny do pobierania próbek betonu zastosowano specjalistyczną ściernicę o nazwie Profile Grinder Kit [10]. Za pomocą takiej ściernicy pobrano warstwami o grubości 6 mm próbki rozdrobnionego betonu z różnych elementów konstrukcyjnych hali zlokalizowanych w pobliżu stanowiska do oczyszczania aluminium i oddległych od tego stanowiska. Wykonano również kontrolne odwierty rdzeniowe betonu o średnicy 50 mm i długości około 40 mm bez stosowania płynów chłodzących. Próbki betonu pobrano z następujących elementów konstrukcyjnych hali: środniki dźwigarów D, zebrą płyt dachowych P, ściany osłonowe SC i słupy S [14].

Z badań betonu odwiertów rdzeniowych uzyskano: średni skład stwardniałego betonu, odczyn pH i zawartość jonów Cl^- . Na próbkach proszku betonowego pobranego z różnych głębokości otuliny oznaczono: wilgotność, straty prażenia, odczyn pH wyciągów wodnych, zawartość spoiwa w betonie oraz zawartość jonów Cl^- [14]. Przykładowe wyniki pomiarów zawartości chlorków Cl^- w betonie otuliny zbrojenia dźwigarów VI i X podano w tabl.1.

Tablica 1. Wyniki pomiarów zawartości jonów Cl^- w betonie otuliny zbrojenia dźwigara VI zlokalizowanego nad stanowiskiem emisji chlorków i w miejscu oddalonym od tego stanowiska (dźwigar X) [14]

Oznaczenie próbek	Usytuowanie warstwy, mm	Odległość środka warstwy od powierzchni, mm	Procentowa zawartość jonów Cl^- rozpuszczalnych				
			w wodzie		w kwasie HNO_3		
			$\text{Cl}^- / \text{beton}, \%$	$\text{Cl}^- / \text{cement}, \%$	$\text{Cl}^- / \text{beton}, \%$	$\text{Cl}^- / \text{cement}, \%$	
Dźwigar VI	D _{1/1}	0 ÷ 6	3	1,492	6,125	1,584	6,502
	D _{1/2}	6 ÷ 12	9	0,232	1,202	0,077	0,399
	D _{1/3}	12 ÷ 18	15	0,036	0,181	0,059	0,296
	D _{1/4}	18 ÷ 24	21	0,009	0,040	0,0094	0,041
	D _{1/5}	24 ÷ 30	27	0,004	0,018	0,0084	0,037
	D _{1/6}	30 ÷ 36	33	0,004	0,020	0,0081	0,040
	D _{1/7}	36 ÷ 42	39	0,001	0,004	0,0071	0,032
Dźwigar X	D _{2/1}	0 ÷ 6	3	0,443	1,436	0,410	1,329
	D _{2/2}	6 ÷ 12	9	0,082	0,388	0,160	0,727
	D _{2/3}	12 ÷ 18	15	0,001	0,005	0,057	0,270
	D _{2/4}	18 ÷ 24	21	0,001	0,004	0,0036	0,015
	D _{2/5}	24 ÷ 30	27	0,001	0,005	0,0016	0,007
	D _{2/6}	30 ÷ 36	33	0,001	0,004	<0,001	0,004
	D _{2/7}	36 ÷ 42	39	0,001	0,004	<0,001	0,004

Badania dokładne zawartości jonów Cl^- (wolne chlorki rozpuszczalne w wodzie) w wyciągach wodnych (stałe $\text{pH} = 7\div 8$) proszku betonowego określono metodą miareczkowania azotanem srebra wobec chromianu potasowego jako wskaźnika [14]. Przy niskich stężeniach jonów chlorkowych oznaczenie przeprowadzono stosując roztwór wzorcowy NaCl o stężeniu $5 \times 10^{-4} \text{ mol/dm}^3$. W próbkach sproszkowanego betonu określono także zawartości jonów chlorkowych rozpuszczalnych w kwasie HNO_3 (całkowita ilość chlorków). Po sprowadzeniu odczynu pH do wartości 4, pomiary przeprowadzono elektrodą jonoselektywną Orion model G4-17BN przy pomocy miernika Thermo Orion 4 Star.

Wyniki badań zawartości chlorków w betonie otuliny różnych elementów konstrukcyjnych hali wykazują [14], że w warstwie przypowierzchniowej betonu elementów znajdujących się w pobliżu stanowisk oczyszczania chlorem stopu aluminium występuje zdecydowanie większa zawartość jonów Cl^- niż w warstwie przypowierzchniowej elementów zlokalizowanych możliwie najdalej od tego stanowiska (tabl.1). Na głębokości powyżej 15 mm różnice te zacierają się.

4. Analiza zawartości chlorków w otulinie zbrojenia i jej wpływ na trwałość konstrukcji

Do teoretycznej analizy zawartości jonów chlorkowych Cl^- w otulinie betonowej zbrojenia w zależności od odległości x od powierzchni i tempa transportu (dyfuzji D_a) jonów Cl^- w głąb betonu zastosowano drugie prawo Ficka [5,6,11], wyrażone równaniem różniczkowym cząstkowym (1):

$$J(x) = -\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

gdzie:

- $J(x)$ – strumień chlorków przemieszczających się jednokierunkowo w półprzestrzeni,
- t – czas wnikania chlorków w głąb betonu,
- D_a – współczynnik dyfuzji chlorków w betonie,
- x – odległość od powierzchni betonu do warstwy o stężeniu chlorków $C(x,t)$.

Równanie (1) można rozwiązać przy założeniu następujących warunków brzegowych: $C(x,t) = C_o$ dla $x = 0$ i $t > 0$ oraz $C(x,t) = 0$ dla $x > 0$ i $t = 0$. Otrzyma się wówczas opisaną wzorem (2) funkcję $C(x,t)$ [5,6,11], będącą całką szczególną równania (1):

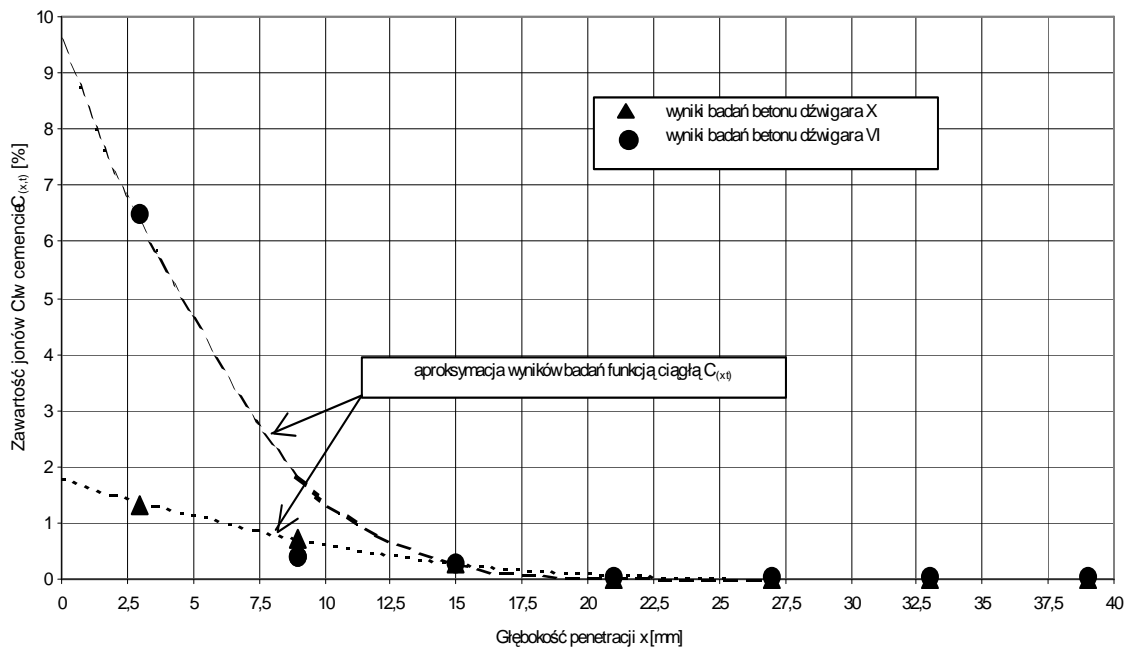
$$C(x,t) = C_o [1 - \text{erf}(z)] = C_o \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (2)$$

gdzie:

- $C(x,t)$ – stężenie jonów chlorkowych w odległości x od powierzchni betonu po czasie t ,
- C_o – stężenie chlorków w powierzchniowej warstwie betonu,
- $\text{erf}(z)$ – funkcja błędu (całka błędu), której wartości mogą być określone dla zadanego argumentu $z = 0,5x/\sqrt{D_a t}$ z tablic podanych w [12].

Wyniki badania zawartości chlorków w betonie otuliny aproksymowano funkcją $C(x,t)$ (2), poprzez odpowiedni dobór wartości C_o i D_a , aby możliwie najlepiej dopasować przebieg tej funkcji do wyników badań doświadczalnych. Dopasowanie funkcji $C(x,t)$ do wyników badań doświadczalnych zawartości jonów Cl^- w betonie warstwy powierzchniowej $0\div 6$ mm

(strefa kapilarnego podciągania chlorków rozpuszczonych w wodzie), warstw pośrednich 6÷18 mm (strefa podciągania i dyfuzji) i tych najgłębszych 18 ÷ 42 mm (strefa dominującej dyfuzji jonów Cl⁻) okazało się niemożliwe ze względu na niestabilizowany proces dyfuzji chlorków w betonie. W opracowaniu [14] funkcję $C(x,t)$ dopasowano oddzielnie do wyników badań w strefie 0÷18 mm (tzn. w strefie bardzo dużego wpływu występującego okresowo kapilarnego podciągania chlorków rozpuszczonych w wodzie i dyfuzji jonów Cl⁻ w betonie o normalnej wilgotności) i w strefie 19÷42 mm dyfuzji jonów Cl⁻ w betonie o stosunkowo niskiej wilgotności. Strefy te zachodzą na siebie na głębokościach 12÷24 mm, ale to nie przeszkodziło w interpretacji wyników badań w celu wykorzystania funkcji $C(x,t)$ do obliczenia okresów teoretycznej trwałości t_{ch} poszczególnych elementów konstrukcyjnych hali [14]. Przykładowy wykres funkcji $C(x,t)$ dla $t = t_{ex}$ (albo $t = t_m$), dopasowanej w przedziale 0÷18 mm do wyników badań, przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Aproksymacja wyników badań doświadczalnych zawartości chlorków w spoiwie (cement) betonu dźwigarów VI i X funkcją $C(x,t)$ dopasowana w warstwach otuliny do głębokości 18 mm [14]

Hala odlewni aluminium jest stosunkowo krótko eksploatowana (rozruch technologiczny nastąpił w maju 2003 r., a pełną zdolność produkcyjną osiągnięto w sierpniu 2005 r.). Od momentu uruchomienia częściowej produkcji (maj 2003 r.) do dnia pobrania próbek betonu do badań (lipiec 2008 r.) minął okres maksymalny $t_{ex} = 63$ miesiące = 5,25 lat. W tym okresie konstrukcja betonowa była narażona na stopniowo wzrastające stężenie chlorków w atmosferze hali (lata 2003 – 2005) i maksymalne w okresie późniejszym po pełnym rozruchu technologicznym wszystkich urządzeń. Stąd też propozycja wprowadzenia do obliczeń współczynnika dyfuzji chlorków (wzory 3) różnych okresów dotychczasowej eksploatacji obiektu (maksymalnego $t = t_{ex} = 5,25$ lat i średniego $t = t_m = 4,0$ lata), przyjmując z jako argument funkcji $erf(z)$ według [14]:

$$erf(z) = 1 - \frac{C(x)}{C_o}, \quad D_a = \frac{x^2}{4 \cdot z \cdot t} \quad (3)$$

Wyniki obliczeń wartości współczynników dyfuzji $D_{a,ex}$ i $D_{a,m}$ odpowiednio dla czasów t_{ex} i t_m w różnych elementach konstrukcji zamieszczone są w pracy [14]. Przykładowy wykres

funkcji $C(x)$ z rys.1, aproksymującej wyniki badań betonu dźwigara VI, uzyskano $dlat_{ex} = 5,25$ lat i $D_{a,ex} = 4,577$ mm²/rok albo dla $t_m = 4,0$ lata i $D_{a,m} = 6,007$ mm²/rok oraz $C_o = 9,55\%$.

Uzyskane wartości współczynników dyfuzji chlorków w betonie $D_{a,ex}$ i $D_{a,m}$ oraz znane przebiegi funkcji $C(x)$ umożliwiają na określenie teoretycznych okresów trwałości poszczególnych elementów konstrukcyjnych hali (okresów przebiecia chemicznego $t_{ch,ex}$ i $t_{ch,m}$), tzn. czasu po jakim stężenie chlorków w warstwie przy zbrojeniu osiągnie wartość krytyczną (dopuszczalną) $C_{lim} = 0,4\%$ dla konstrukcji żelbetowych i $C_{lim} = 0,2\%$ dla konstrukcji sprężonych [10].

W tabl. 2 podano przykładowe wyniki obliczeń teoretycznego okresu trwałości $t_{ch,ex}$ i $t_{ch,m}$ głównych elementów konstrukcyjnych dachu hali (dźwigary dachowe i płyty TT) obliczone ze wzoru:

$$t_{ch} = \frac{x^2}{4 \cdot z^2 \cdot D_a} \quad (4)$$

Tablica 2. Teoretycznie okresy trwałości (eksploatacji) głównych elementów konstrukcyjnych dachu hali (dźwigar VI i płyta TT – P₁ nad stanowiskiem chlorowania aluminium oraz dźwigar X i płyta TT – P₂ odległe od stanowiska chlorowania [14])

Oznaczenie próbek betonu i miejsce pobrania	Rodzaj stali w elementach	C_o	C_{lim}	$erf(z)$ ($C_x=C_{lim}$)	z	x	$D_{a,ex}$	$t_{ch,ex}$	$D_{a,m}$	$t_{ch,m}$
		%	%			mm	mm ² /rok	lata	mm ² /rok	lata
D ₁ Dźwigar VI	sprężająca	9,55	0,2	0,9791	1,637	45	4,577	41,1	6,007	31,3
	zwykła		0,4	0,9581	1,439			53,3		40,6
D ₂ Dźwigar X	sprężająca	1,80	0,2	0,8890	1,122	45	10,339	38,9	13,570	29,6
	zwykła		0,4	0,7780	0,863			65,7		50,1
P ₁ Płyta TT	sprężająca	8,42	0,2	0,9763	1,600	45	4,637	42,6	6,087	32,5
	zwykła		0,4	0,9525	1,401	30		24,8		19,0
P ₂ Płyta TT	sprężająca	2,85	0,2	0,9298	1,281	45	6,781	45,6	8,900	34,7
	zwykła		0,4	0,8596	1,043	30		30,5		23,2

5. Wnioski

- 5.1. Wyniki badań otuliny betonowej zbrojenia elementów konstrukcji hali odlewnej aluminium potwierdziły wcześniejsze przypuszczenia [13] o wysokiej agresywności środowiska chlorkowego wewnątrz hali powstałego w wyniku procesów technologicznych i okresowych zmian warunków cieplno – wilgotnościowych., Nagromadzone na konstrukcji w postaci pyłów i następnie rozpuszczone w wodzie chlorki wnikają kapilarnie w otulinę zbrojenia i przy odpowiedniej wilgotności względnej w głębszych warstwach otuliny stają się materiałem wyjściowym dla dyfuzji jonów Cl⁻ w kierunku zbrojenia.
- 5.2. Wprowadzony w pracy podział elementów konstrukcji budynku hali na ciepłe i zimne wynika z konieczności zdefiniowania szkodliwości środowiska chlorkowego wewnątrz hali i związanego z tym zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej. Warunkiem występowania środowiska XD1 w całym budynku – a więc również na styku atmosfery wewnętrznej z obudową (dach, ściany osłonowe, okna, drzwi, wrota, wywietrzniki dachowe i nawietrzniki w ścianach) – jest odpowiednia izolacyjność cieplna przegród zabezpieczająca je przed powstawaniem punktu rosy. Jeśli na tych elementach okresowo wykrapla się woda (np. na nieocieplonych ścianach zewnętrznych), to elementy te należy traktować jak eksploatowane w środowisku XD3 (według norm [15,16] jest to środowisko cyklicznie mokre i suche).

- 5.3. Z elementów konstrukcyjnych hali za elementy ciepłe można uznać ocieplony dach (strunobetonowe płyty TT i strunobetonowe dźwigary dachowe) i słupy żelbetowe. Elementy te w hali odlewni aluminium powinny pracować w środowisku chlorkowym XD1 o umiarkowanej wilgotności powietrza (chlorki z powietrza nie pochodzące z wody morskiej [15,16]). Tak byłoby, gdyby nie okresowe zmiany warunków ciepłno – wilgotnościowych wewnątrz hali spowodowane długą awarią bądź przerwą remontową (przerwa taka wystąpiła w trakcie pobierania próbek do badań). W hali w trakcie przerwy remontowej konstrukcja uległa zawilgoceniu w wyniku kondensacji pary wodnej z powietrza, co równoznaczne jest z powstaniem środowiska XD3 [15,16], gdyż na powierzchni oziębionych elementów wystąpiło bardzo agresywne środowisko chlorowe w wyniku rozpuszczenia się w wodzie chlorków zawartych w pyłach technologicznych i kapilarnym ich wsiąkaniu w głąb betonu.
- 5.4. Badania betonu otuliny zbrojenia głównych elementów konstrukcyjnych hali odlewni aluminium wykazały bardzo dużą koncentrację chlorków w warstwie przypowierzchniowej betonu (w elementach ciepłych do głębokości 6 mm, a zimnych do 12 mm) zależną od usytuowania elementów względem stanowiska chlorowania ciekłego stopu aluminium [14]. W warstwach otuliny na głębokości powyżej 15 mm zawartość chlorków w betonie w niewielkim stopniu zależy od usytuowania danego elementu względem stanowiska chlorowania. Świadczy to pośrednio o dużym oporze dyfuzyjnym betonu w głębszych warstwach otuliny (beton elementów ciepłych ma wilgotność $0,5 \div 0,8\%$, a zimnych ścian $1,5 \div 2,0\%$ [14]).
- 5.5. W otulinie zbrojenia słupów żelbetowych stwierdzono przekroczenie krytycznej zawartości chlorków $C_{lim} = 0,40\%$ do głębokości około 12 mm, a w ścianach do głębokości około 15 mm. Dla elementów sprężonych (dźwigary i płyty TT) przekroczenie wartości $C_{lim} = 0,2\%$ występuje do głębokości około 18 mm. W warstwach otuliny na głębokości powyżej 33 mm zawartość chlorków oscyluje w pobliżu $0,02\%$ masy cementu w betonie (wartość ta może być uznana jako stężenie pierwotne chlorków pochodzących ze składników betonu). Oznacza to, że beton głębszych warstw otuliny zawiera bardzo małe ilości chlorków Cl^- i konstrukcja nie jest zagrożona aktualnie korozją chlorkową zbrojenia.
- 5.6. Kompleksowe badania betonowej otuliny zbrojenia elementów żelbetowych i strunobetonowych hali odlewni aluminium określiły skalę zanieczyszczeń chlorkami warstw powierzchniowych i wgłębnych otuliny po około pięcioletnim okresie eksploatacji obiektu. Wyniki badań doświadczalnych i teoretycznych pozwoliły określić teoretyczne okresy trwałości t_{ch} poszczególnych elementów konstrukcji hali w zależności od dotychczasowych okresów eksploatacji t_{ex} lub t_m [14]. Do tego celu wykorzystano drugie prawo Ficka [5,6,11] opisujące szybkość dyfuzji jonów Cl^- w głąb betonu.
- 5.7. Okresy trwałości poszczególnych elementów konstrukcyjnych hali wyliczone z uwzględnieniem dotychczasowego okresu eksploatacji $t_{ex} = 5,25$ lat w środowisku chlorkowym wynoszą odpowiednio:
- żelbetowe słupy oraz środki dźwigarów i zebrą płyt TT (zbrojenie zwykłe) hali mają najdłuższy okres eksploatacji wynoszący minimum 50 lat (przy założeniu braku rys skurczowych),
 - elementy sprężone (półki dolne dźwigarów dachowych i zebrą płyt TT) – wyliczony okres trwałości około 30 lat,
 - zbrojenie zwykłe w płycinie płyt TT (ze stosunkowo najmniejszą ze wszystkich elementów żelbetowych otuliną zbrojenia wynoszącą 30 mm) zabezpieczone jest przed agresją chlorkową na około 25 lat,
 - płyty ścian zewnętrznych – okres trwałości około 40 lat.

W obliczeniach okresów trwałości t_{ch} założono stałą wartość współczynnika dyfuzji chlorków $D_{a,ex}$ i najdłuższy z możliwych okresów $t_{ex} = 5,25$ lat dotychczasowego czasu eksploatacji obiektu. Dla czasu średniego t_m teoretyczne okresy trwałości poszczególnych elementów konstrukcyjnych maleją o około 25% (upłynął zbyt krótki okres użytkowania hali, w czasie którego następował rozruch technologiczny przy zmiennym natężeniu chlorków wewnątrz obiektu). Uściślenie powyższych okresów trwałości będzie możliwe po dłuższym okresie użytkowania obiektu (np. za 5 lat przy ponownych badaniach betonu otuliny).

6. Zalecenia

Na podstawie uzyskanych wyników badań betonu otuliny różnych elementów konstrukcji hali odlewni aluminium oraz obliczonych okresów trwałości, uwzględniających dotychczasowe tempo wnikania chlorków w głąb otuliny, podano niżej kilka zaleceń dotyczących dalszej eksploatacji przedmiotowej hali.

1. W okresie nie dłuższym niż 5 lat (tzn. do lipca 2013 roku) należy przeprowadzić ponowne badania betonu otuliny w zakresie podobnym do obecnych (włączając dodatkowo badania betonu płyciny płyt TT, cechującej się najkrótszym oszacowanym okresem trwałości). Badania te pozwolą określić intensywność wnikania chlorków w głąb otuliny betonowej w okresie dłuższym od dotychczasowego czasu $t_{ex} = 5,25$ lat. Badania wykonane po dłuższym okresie użytkowania hali pozwolą na uściślenie obliczeń przewidywanego okresu trwałości obiektu i podjęcie właściwej decyzji, co do sposobu zabezpieczenia elementów zagrożonych korozją chlorkową zbrojenia.
2. Należy zainstalować kontrolowany system nawiewu do wnętrza hali powietrza zewnętrznego o określonej wilgotności (instalacja klimatyzacji z monitoringiem temperatury i wilgotności powietrza pod dachem hali), tak aby wilgotność względna powietrza w obrębie ciepłych elementów hali przy zadanej temperaturze (np. 25°C) była znacznie niższa od wilgotności odpowiadającej punktowi rosy. Uchroni się w ten sposób dźwigary dachowe, płyty TT i słupy od okresowego zawilgocenia (np. podczas dłuższych przerw technologicznych i remontów), powodującego uaktywnianie się chlorków zawartych w pyłach technologicznych,
3. Ściany osłonowe są obecnie elementami zimnymi i łatwo ulegają zawilgoceniu. Oczywiście można je eksploatować w obecnym stanie, aż do ich zużycia (np. 30 lat), akceptując ich nieestetyczny wygląd. Można je ewentualnie docieplić z zewnątrz styropianem i wtedy uzyska się cechy elementów ciepłych, na których nie będzie występować zjawisko kondensacji pary wodnej (zwiększy się trwałość i estetyka ścian).
4. Wskazane jest ograniczenie emisji chlorków do wnętrza hali poprzez wychwycenie ich znacznej części nad stanowiskami chlorowania ciekłego stopu aluminium, bądź przeniesienie tych stanowisk do innego obiektu. Należy jednak zaznaczyć, że brak jest aktualnie badań dotyczących podziału pyłów technologicznych gromadzących się na konstrukcji hali na te pochodzące bezpośrednio ze stanowisk chlorowania i inne (np. z kadzi ze stopem wlewanym porcjami do foremek kształtujących odlewy). Jeśli okaże się, że zanieczyszczenia z innych źródeł będą powodować również gromadzenie się pyłów zawierających chlorki to przenoszenie stanowisk chlorowania nie da oczekiwanych efektów w postaci zmniejszenia zagrożenia konstrukcji korozją chlorkową (może obniżyć się temperatura wewnątrz hali a w konsekwencji wystąpi większe ryzyko wykraplania się wody na elementach hali).
5. Problem ewentualnego pokrycia powierzchni betonu powłokami zabezpieczającymi przed wnikaniem rozpuszczonych w wodzie chlorków w głąb otuliny zbrojenia pozostaje

otwarty. Decyzja o zastosowaniu odpowiednich powłok ochronnych powinna być podjęta po wykonaniu następnych badań betonu za 5 lat (wykonanie powłok ochronnych jest bardzo drogie i nie zawsze skuteczne [3÷6]).

Literatura

1. Wah L.T., Ong H.: An Integrated Approach Towards the Maintenance of Concretes Structures. An International Conference on Inspection. Appraisal. Repair & Maintenance of Buildings & Structures, 1989, Singapore
2. Czarnecki L.: Uszkodzenia i naprawy betonu. Inżynieria i Budownictwo nr 2/2002, s. 59÷65
3. Wieczorek G.: Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2002
4. Czarnecki L., Łukowski P.: Naprawa konstrukcji betonowych użytkowanych w warunkach zagrożeń chemicznych. Materiały Budowlane nr 12/2005, s. 14÷16
5. Ściślewski Z.: Ochrona konstrukcji żelbetowych. Arkady, Warszawa 1999
6. Ściślewski Z.: Utrzymanie konstrukcji żelbetowych. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Seria: Monografie, Warszawa 1997
7. Ajdukiewicz A.: Projektowanie konstrukcji betonowych z uwzględnieniem okresu użytkowania. Inżynier Budownictwa nr 9/2006, str. 10÷16
8. Kubiak J., Łodo A., Michałek J.: Naprawa i zabezpieczenie powierzchniowe strunobetonowych dźwigarów dachowych użytkowanych w warunkach agresywności chlorkowej. Materiały XV Konferencji Naukowo-Technicznej „Kontra 2006”. Warszawa – Zakopane 2006, Miesięcznik „Ochrona przed korozją” Rok XLIX, Nr 5s/A/2006, s. 99÷104
9. Kubiak J., Łodo A., Michałek J.: Badanie szkodliwego oddziaływania chlorków na żelbetową konstrukcję hali odlewni aluminium. Materiały XVI Konferencji Naukowo-Technicznej „Kontra 2008”. Warszawa – Zakopane 2008, Miesięcznik „Ochrona przed korozją” Rok LI Nr 5s/A/2008, s. 159÷164
10. Instytut Badawczy Dróg i Mostów: Zalecenia dotyczące oceny jakości betonu „in-situ” w istniejących konstrukcjach obiektów mostowych (załącznik do Zarządzenia Nr 11 Generalnego Dyrektora Dróg Publicznych z dnia 3 grudnia 1998 r.) Wrocław-Żmigród, 1998.
11. Poulsen E.: Estimation of chloride ingress and service life prediction in RC structures exposed to marine environment. Proceedings of Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete, Science and Technology, Rome 8 October 1997, s.219–237,
12. Tichonow A.N., Samarski A.A.: Równania fizyki matematycznej. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa 1963
13. Kubiak J., Łodo A., Michałek J.: Kompleksowa ocena stanu technicznego konstrukcji hali odlewni aluminium... Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, raport serii SPR Nr 1/2008, Wrocław 2008
14. Kubiak J., Łodo A., Michałek J.: Badania stopnia stężenia chlorków w otulinie betonowej zbrojenia elementów konstrukcyjnych hali odlewni aluminium...”. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR Nr 33/2008, Wrocław 2008
15. PN-EN 206-1:2000. Beton. Część I: Wymagania, wykonywanie, produkcja, zgodność
16. PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
17. PN-EN 13369:2005. Wspólne wymagania dla prefabrykatów betonowych.