

Korozja konstrukcji stalowych zlokalizowanych w pasie nadmorskim – przyczynek do dyskusji o metodach ustalania kategorii korozyjności atmosfery

JAROSŁAW BŁYSZKO*, TOMASZ WRÓBLEWSKI

Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, al. Piastów 50a, 70-311 Szczecin

Streszczenie: Od elementów małej architektury umieszczanych w miejscach publicznych np. w ciągach promenad nadmorskich wymagany jest nietuzinkowy i nieskazitelny wygląd. Jeśli element wykonany jest ze stali i zlokalizowano go w bezpośrednim sąsiedztwie zasolonego akwenu, problemy z korozją są kwestią czasu. Czas ten może być bardzo krótki przy źle określonej kategorii korozyjności atmosfery konsekwencją czego jest źle dobrany system zabezpieczenia konstrukcji przed korozją.

Słowa kluczowe: korozja metali, depozycja chlorków, kategoria korozyjność atmosfery

1. Wprowadzenie

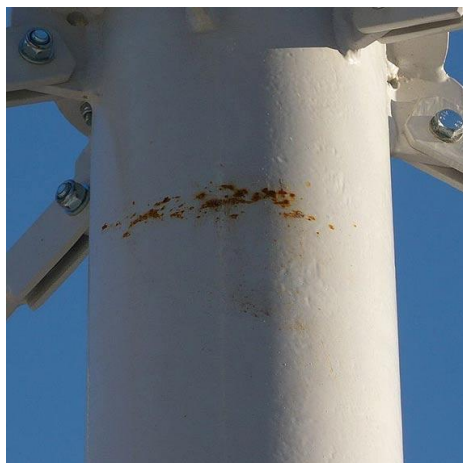
Konstrukcje stalowe, realizowane w przestrzeniach nadmorskich promenad spacerowych mają pełnić głównie rolę ozdobną i reprezentacyjną. Przykładem takich konstrukcji mogą być maszty oświetleniowe, lampy, zacieniacze, ringi świetlne oraz inne obiekty małej architektury – patrz rys. 1. Estetyczny wygląd konstrukcji wymagany jest przez cały okres eksploatacji elementów.



Rys. 1. Konstrukcje stalowe będące przedmiotem referatu. [źródło: Internet].

*Autor do korespondencji: blyszko@zut.edu.pl

Nieprawidłowo wykonane zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji może spowodować, że w bardzo krótkim czasie od wykonania konstrukcji pojawią się pierwsze ogniska korozji. Sytuacja taka miała miejsce w Świnoujściu na elementach konstrukcji stalowych stanowiących ozdobę promenady, pomimo bardzo krótkiego czasu, który upłynął od momentu ich wykonania pojawiły się oznaki korozji. Pierwsze doniesienia na temat problemów z korozją elementów stalowych podawane były już kilka miesięcy po wykonaniu konstrukcji. Świadczy to zarówno o złej jakości zabezpieczeń antykorozyjnych jak również o dużej agresywności środowiska – patrz rys. 2.



Rys. 2. Korozja stalowych elementów na terenie inwestycji [Źródło: <https://iswinoujscie.pl/artykuly/60923/>].

Przedmiotowa inwestycja realizowana była w niewielkiej odległości od linii brzegowej, a prawidłowe określenie kategorii korozyjności atmosfery było niezbędne dla przyjęcia właściwego sposobu zabezpieczenia konstrukcji stalowych przed korozją.

Artykuł przedstawia analizę stanu wiedzy na temat wpływu atmosfery morskiej na korozję elementów stalowych, analizę środowiska na terenie inwestycji oraz ostateczne ustalenie kategorii korozyjności atmosfery. Prawidłowe przyjęcie kategorii korozyjności atmosfery jest istotne ze względu na przyjęcie właściwego sposobu zabezpieczeń oraz ewentualnych roszczeń gwarancyjnych.

2. Wpływ atmosfery morskiej na korozję metali w świetle danych literaturowych

Korozja atmosferyczna powoduje największe straty ekonomiczne spośród wszystkich znanych rodzajów korozji. Ocenia się, że koszty ochrony przed korozją atmosferyczną wynoszą około 70% nakładów ponoszonych na wszystkie rodzaje zabezpieczeń antykorozyjnych [4]. Korozja atmosferyczna ma charakter elektrochemiczny. Przebiega z udziałem wody pochodzącej np. z opadów czy skroplonej pary wodnej oraz z nieograniczonym dostępem tlenu. Podczas korozji atmosferycznej, na powierzchni metalu zachodzą równocześnie dwa procesy: anodowy i katodowy. W procesie anodowym następuje utlenianie metalu tzn. jego przejście ze stanu metalicznego w stan jonowy. Proces katodowy przebiega w dwójakiej formie, w zależności od pH środowiska. W środowisku kwaśnym następuje katodowa redukcja jonów wodorowych z wydzieleniem wodoru, natomiast w środowisku obojętnym i zasadowym następuje katodowa redukcja tlenu w roztworze wodnym, z utworzeniem jonów wodorotlenowych. Produkty

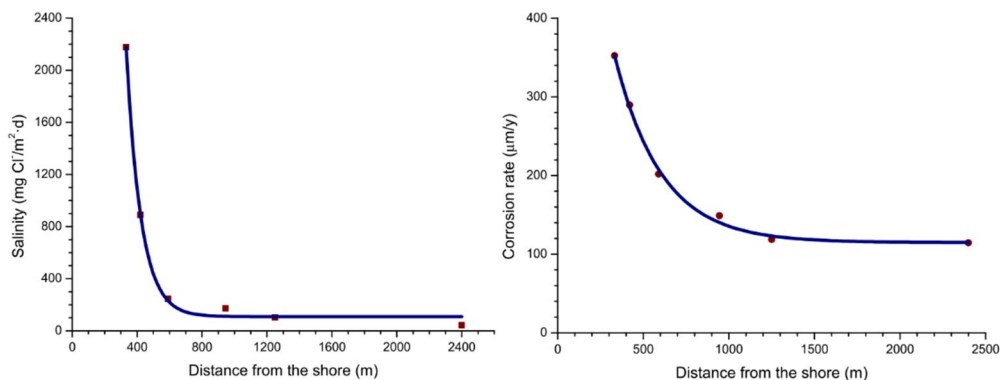
korozji na powierzchni metalu powstają na granicy obszarów anodowych i katodowych w wyniku zachodzących wtórnych reakcji chemicznych.

Do podstawowych czynników środowiskowych i atmosferycznych, które są odpowiedzialne za powstawanie korozji atmosferycznej, należą [5]:

- działanie wody w jej wszelkiej postaci,
- duża wilgotność względna powietrza,
- zawartość w powietrzu chlorków,
- działanie temperatury i jej zmiany,
- działanie promieniowania UV,
- zawartość w powietrzu substancji gazowych, głównie SO_2 , NO_x , H_2S , CO_2 itp.,
- zawartość w powietrzu lotnych węglowodorów aromatycznych i alifatycznych,
- zawartość w powietrzu pyłów powstających podczas spalania paliw węglowych.

Na temat wpływu atmosfery morskiej na korozję metali powstało wiele prac na całym świecie. W wielu z nich zwracano uwagę na fakt, że zawartość jonów chlorkowych Cl^- a tym samym ubytków korozyjnych stali, w bardzo dużej mierze zależy od odległości konstrukcji od linii brzegowej.

Alcantara i inni [7] wykazali w wyniku obszernych badań doświadczalnych przeprowadzonych na wybrzeżu Hiszpanii, że depozycja jonów chlorkowych Cl^- (wyrażana w miligramach na metr kwadratowy na dzień) bardzo silnie zależy od odległości od linii brzegowej. Jest to efekt wysokiego stężenia jonów chlorkowych pochodzących z aerozolu morskiego stanowiącego zespół rozpylonych w powietrzu kropeł wody morskiej oraz cząstek uformowanych w wyniku procesów parowania wody morskiej pod wpływem działania wiatru. Bardzo wysoka depozycja chlorków a tym samym wysoki stopień korozji wyrażany w mikrometrach na rok utrzymują się nawet w odległości do 1000 metrów od linii brzegowej.



Rys. 3. Depozycja chlorków oraz ubytek grubości w funkcji odległości od morza wg [7].

Do podobnych wyników doszedł Gustafsson w swoich badaniach przeprowadzonych na południowo zachodnim wybrzeżu Szwecji [8]. Wykazał on, że sucha depozycja soli morskiej silnie zależy od odległości od morza. Gwałtowny wzrost depozycji obserwować można dla odległości od linii brzegowej mniejszej niż 400 m. Z wyników jego pracy korzystał również Haberecht w swojej rozprawie doktorskiej [9].

Podobne wyniki badań, wykazujące, że zarówno stężenie jonów chlorkowych w powietrzu a co za tym idzie również wielkość ich suchej depozycji przekładająca się na wielkość ubytków korozyjnych doszli również inni badacze z innych krajów np. Hernández (Kuba) [10],

Corvo (Kuba) [11], Somay (Turcja) [12] czy Meira (Brazylia) [13]. Jak zatem widać zależność ta występuje niezależnie od regionu oraz od akwenu w tym jego zasolenia.

Przykładem krajowych badań również pokazujących wyraźną zależność pomiędzy odległością od linii brzegowej Bałtyku a wielkością depozycji jonów chlorkowych Cl^- a co za tym również idzie szybkością korozji, są badania prowadzone przez dr inż. Mariana Głuszko przedstawione w [4–6]. W trakcie przeprowadzonych na szeroką skalę badań, obejmujących dziewięć stanowisk pomiarowych na terenie całego kraju, przeprowadzono badania w środowiskach: nadmorskim, przemysłowym, miejsko-przemysłowym, miejskim i wiejskim (w atmosferze umownie czystej). Badania te wykonano w latach 1997–1998 [6]. Badano szybkości korozji czterech podstawowych metali konstrukcyjnych oraz wielkość depozycji SO_2 i chlorków Cl^- .

Lp.	Miejsce badania	Szybkość korozji				Wielkość depozycji SO_2	Wielkość depozycji Cl^-
			$\text{g m}^{-2} \text{ m-c}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$	$\mu\text{m rok}^{-1}$	$\text{mg m}^{-2} \text{ doba}^{-1}$	$\text{mg m}^{-2} \text{ doba}^{-1}$
1	ŁAGISZA	M-1	1,61	18,12	2,03	151,3	10,2
		A-1	0,44	5,09	1,88		
		Zn	3,28	38,21	5,35		
		St3S	54,06	633,80	80,64		
2	TARNÓW	M-1	1,02	9,69	1,09	44,6	6,2
		A-1	0,34	3,08	1,14		
		Zn	1,98	18,03	2,52		
		St3S	29,28	289,30	36,81		
3	SOLINA	M-1	0,35	3,41	0,38	12,3	0,13
		A-1	0,26	2,48	0,92		
		Zn	0,81	7,51	1,05		
		St3S	16,63	154,00	19,59		
4	PUŁAWY	M-1	1,79	20,27	2,27	160,5	11,2
		A-1	0,45	5,21	1,93		
		Zn	3,39	39,92	5,59		
		St3S	58,80	689,40	87,71		
5	DUNOWO	M-1	0,42	3,84	0,43	17,5	24,6
		A-1	0,27	2,51	0,93		
		Zn	1,63	15,66	2,19		
		St3S	28,73	264,50	33,65		
6	ŻARNOWIEC	M-1	0,48	4,72	0,53	18,5	28,7
		A-1	0,29	2,89	1,07		
		Zn	1,80	17,11	2,40		
		St3S	27,77	267,80	34,07		
7	HUTA GŁOGÓW	M-1	2,05	23,74	2,66	176,8	15,9
		A-1	0,49	5,16	1,91		
		Zn	3,87	45,21	6,55		
		St3S	66,10	784,30	99,78		
8	TURÓW	M-1	1,69	19,44	2,18	162,1	11,4
		A-1	0,48	5,76	2,13		
		Zn	3,41	38,83	5,44		
		St3S	56,34	659,60	83,92		
9	WROCLAW	M-1	1,58	16,54	1,85	86,3	4,7
		A-1	0,39	4,08	1,51		
		Zn	2,16	20,11	2,83		
		St3S	49,60	433,80	67,91		

Rys. 4. Korozyjność środowisk atmosferycznych na terenie Polski wg [6].

Analiza zebranych danych pozwoliła wskazać dwa miejsca wyróżniające się pod kątem wielkości depozycji chlorków Cl^- :

- wieś Dunowo, powiat koszaliński, położona w odległości ~17 km od wybrzeża Bałtyku,
- wieś Żarnowiec, powiat Pucki, położona w odległości ~5 km od wybrzeża Bałtyku.

W obydwu tych lokalizacjach zaobserwowano wyraźnie większą depozycję chlorków niż w pozostałych siedmiu lokalizacjach rozlokowanych w kraju. We wsi Żarnowiec ze względu na mniejszą odległość od linii brzegowej depozycja jest o 17% wyższa niż w Dunowie. Wielkości odnotowanych w trakcie badań ubytków korozyjnych pozwoliły zaklasyfikować obydwie lokalizacje do kategorii korozyjności atmosfery C3 wg [14]. Atmosferę w tych lokalizacjach określono jako nadmorską o słabym zasoleniu.

Z badań przedstawionych w pracach dra Głuszko [4–6] wynika jednoznaczny silny wpływ atmosfery morskiej i zawartych w niej aerozoli morskich na wielkość depozycji jonów chlorkowych Cl^- , która jest jednym z głównych czynników powodujących korozję stali. Należy zwrócić uwagę, że nawet miejsca oddalone od linii brzegowej o kilka (Żarnowiec) lub kilkanaście (Dunowo) kilometrów pozostają pod silnym wpływem atmosfery morskiej.

Jak wykazano w licznych wymienionych powyżej pracach wielkość depozycji jonów chlorkowych Cl^- silnie rośnie w miarę zbliżania się do linii brzegowej, gdzie może osiągać wartości nawet do kilkuset lub kilku tysięcy miligramów na metr kwadratowy na dzień. Wielkość ta silnie zależy od wielu czynników między innymi od kierunku i prędkości wiatru. Porównując wielkość depozycji w odległości kilkuset metrów od brzegu z wartością w odległości kilku kilometrów zauważyć można kilku lub nawet kilkunastokrotne zwiększenie wartości depozycji co z kolei przekłada się na kilkukrotne zwiększenie ubytków korozyjnych spowodowanych korozją stali.

3. Korozyjność atmosfery wg przepisów normowych

PN-EN ISO 12944-2 [14]

Zgodnie z normą [14] korozja atmosferyczna jest procesem, który zachodzi w warstwie wilgoci na powierzchni metalu. Warstwa wilgoci może być tak cienka, że jest niewidoczna dla nieuzbrojonego oka. Szybkość korozji zwiększają następujące czynniki:

- wzrost wilgotności względnej,
- występowanie kondensacji (gdy temperatura powierzchni jest równa punktowi rosy lub jest niższa),
- wzrost ilości zanieczyszczeń w atmosferze (zanieczyszczenia korozyjne mogą reagować ze stalą i mogą tworzyć osady na powierzchni).

Doświadczenie wskazuje, że znacząca korozja ma zwykle miejsce, gdy wilgotność względna jest powyżej 80% a temperatura powyżej 0°C. Jeżeli jednak obecne są zanieczyszczenia i/lub higroskopijne sole korozja występuje przy znacznie niższych poziomach wilgotności.

Wg rozdziału 5.1.1 normy [14] środowiska atmosferyczne zostały sklasyfikowane w sześciu kategoriach korozyjności i zostały przedstawione w normie ISO 9223 [15].

Wg rozdziału 5.1.2 w celu określenia kategorii korozyjności usilnie zaleca się ekspozycję próbek wzorcowych. W tablicy 1 normy [14] zdefiniowano kategorie korozyjności ze względu na ubytek masy lub grubości takich próbek wzorcowych wykonanych ze stali niskowęglowej i/lub cynku po pierwszym roku ekspozycji. Szczegóły dotyczące próbek wzorcowych ich obróbki przed ekspozycją i po ekspozycji podano w normie ISO 9226. Jeżeli nie jest możliwa ekspozycja próbek wzorcowych w rzeczywistym środowisku będącym przedmiotem zainteresowania kategorie korozyjności można oszacować na podstawie

przykładów typowych środowisk podanych w tabelicy 1. Należy jednak zachować szczególną uwagę, wyszczególnione przykłady i opisy środowiska podane w normie pełnią rolę wyłącznie informacyjną i sporadycznie mogą być mylące. Tylko rzeczywisty pomiar ubytku masy lub grubości daje prawidłową klasyfikację. W przypadkach wątpliwych np. gdy ubytki masy stali i cynku wskazują na różne kategorie korozyjności, należy przyjmować kategorię wyższą.

PN-EN ISO 9223 [15]

Zgodnie z normą ISO 9223 korozyjność atmosfery powinna być klasyfikowana przez określenie korozyjności na podstawie pomiaru ubytków korozyjnych standardowych próbek metali specyfikowany w normie ISO 9226 lub jeśli to nie jest możliwe przez ocenę korozyjności na podstawie informacji o środowisku, czyli w oparciu o obliczenia ubytków korozyjnych. Obie metody oceny korozyjności stanowią uogólnione podejście i charakteryzują się różnymi niepewnościami i ograniczeniami.

Kategoria korozyjności określana na podstawie ubytków korozyjnych po pierwszym roku ekspozycji odzwierciedla specyficzne warunki środowiska w roku ekspozycji. Kategorie korozyjności oceniana za pomocą równania dawka-odpowiedź odzwierciedla statystyczną niepewność tej funkcji. Kategorie korozyjności oceniana przy użyciu informacyjnego opisu oparta na porównaniu lokalnych warunków środowiskowych z opisem typowych warunków atmosferycznych może prowadzić do złej interpretacji. Podejście to powinno być stosowane wyłącznie w sytuacji, gdy dane doświadczalne nie są dostępne.

Równania dawka-odpowiedź dla stali węglowej podano w [15] w postaci:

$$r_{corr} = 1,77 \cdot P_d^{0,52} \cdot \exp(0,020 \cdot RH + f_{st}) + 0,102 \cdot S_d^{0,62} \cdot \exp(0,033 \cdot RH + 0,040 \cdot T)$$

$$f_{st} = 0,150(T - 10) \text{ gdy } T \leq 10^\circ C$$

gdzie:

- r_{corr} – ubytek korozyjny metalu po pierwszym roku, mikrometry na rok [mm/a],
- T – średnia roczna temperatura, stopnie Celsjusza [°C],
- RH – średnia roczna wilgotność względna, procenty [%],
- P_d – średnia roczna depozycja SO₂, miligramy na metr kwadrat na dzień [mg/(m²d)],
- S_d – średnia roczna depozycja Cl⁻, miligramy na metr kwadrat na dzień [mg/(m²d)].

PN-EN 1993-1-4 [16, 17]

Norma PN-EN 1993-1-4 [16] oraz zmiana tej normy wprowadzona w roku 2015 [17] określają zasady doboru właściwego gatunku stali nierdzewnej w zależności od środowiska eksploatacji elementów konstrukcyjnych. Dobór gatunku stali poprzedzany jest oceną środowiska wykonywaną za pomocą współczynnika odporności korozyjnej będącego sumą trzech składowych CRF = F₁ + F₂ + F₃ gdzie: F₁ – ryzyko wystawienia na oddziaływanie chlorków pochodzących ze słonej wody lub soli drogowej; F₂ – ryzyko wystawienia na oddziaływanie dwutlenku siarki; F₃ – wymogi okresowego czyszczenia lub naturalnego zmywania przez deszcz.

Największy wpływ na określenie wartości współczynnika CRF ma współczynnik F₁ określający ryzyko narażenia konstrukcji na działanie chlorków Cl⁻ pochodzących ze słonej wody. Dla przykładu, wartość tego współczynnika dla wszystkich obszarów przybrzeżnych Bałtyku, przy założeniu, że odległość od linii brzegowej jest mniejsza niż 250 metrów wynosi F₁ = -10 co oznacza, że istnieje bardzo wysokie ryzyko oddziaływania chlorków na

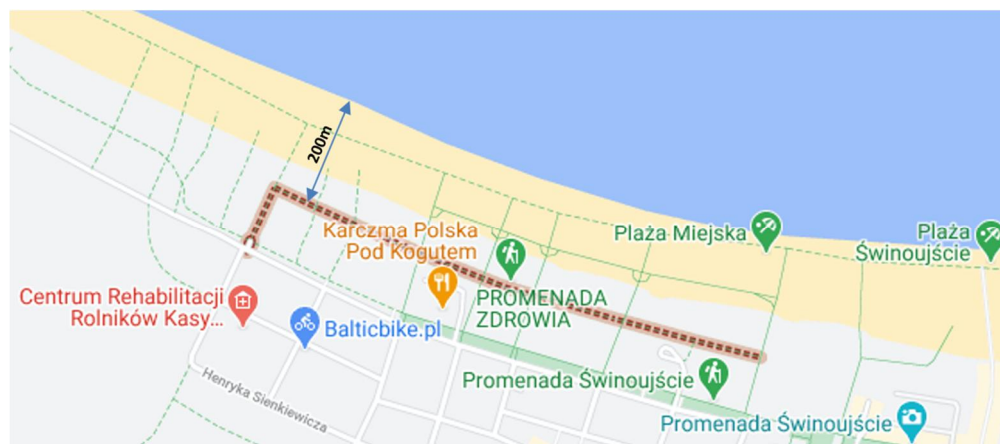
konstrukcję. Z powyższego wynika, że nawet przy założeniu braku oddziaływań pochodzących od dwutlenku siarki $F_2 = 0$ i przy założeniu naturalnego zmywania przez deszcz (nie zawierający jonów chlorkowych) $F_3 = 0$, CRF wyniesie -10 co oznacza konieczność zastosowania stali nierdzewnej o klasie odporności korozyjnej CRC = III w skali pięciostopniowej.

4. Lokalizacja i klimat – podstawa wnioskowania o korozyjności atmosfery

W praktyce inżynierskiej przyjęcie kategorii korozyjności atmosfery jest arbitralną decyzją projektanta i często związane jest z koniecznością optymalizacji kosztów całej inwestycji. Przyjęcie niskiej klasy korozyjności atmosfery, to oczywiste zmniejszenie sumarycznych kosztów wykonania systemu powłok zabezpieczających. Wykonawca dążył będzie zatem do przyjęcia minimalnej klasy korozyjności. Problemem jest jednoznaczne ustalenie klasy korozyjności atmosfery zgodnej z przepisami normowymi, która ucina dyskusję na linii Inwestor – Wykonawca. Z niewielkiej odległości od brzegu morskiego wynika oczywisty fakt dużej agresywności korozyjnej atmosfery – co należy jednak udowodnić stosownymi zapisami normowymi lub wynikami badań doświadczalnych. Jak wykazano w obiegu funkcjonuje kilka norm [15–18], w których dla przeciętnego projektanta widoczny jest problem precyzyjnego ustalenia kategorii korozyjności atmosfery, szczególnie w sytuacji braku odpowiednich danych dotyczących klimatu na terenie inwestycji.

Lokalizacja

Promenada Zdrowia, na której zlokalizowano większość korodujących konstrukcji stałowych zlokalizowana jest w Świnoujściu w odległości około 200 metrów od linii brzegowej.

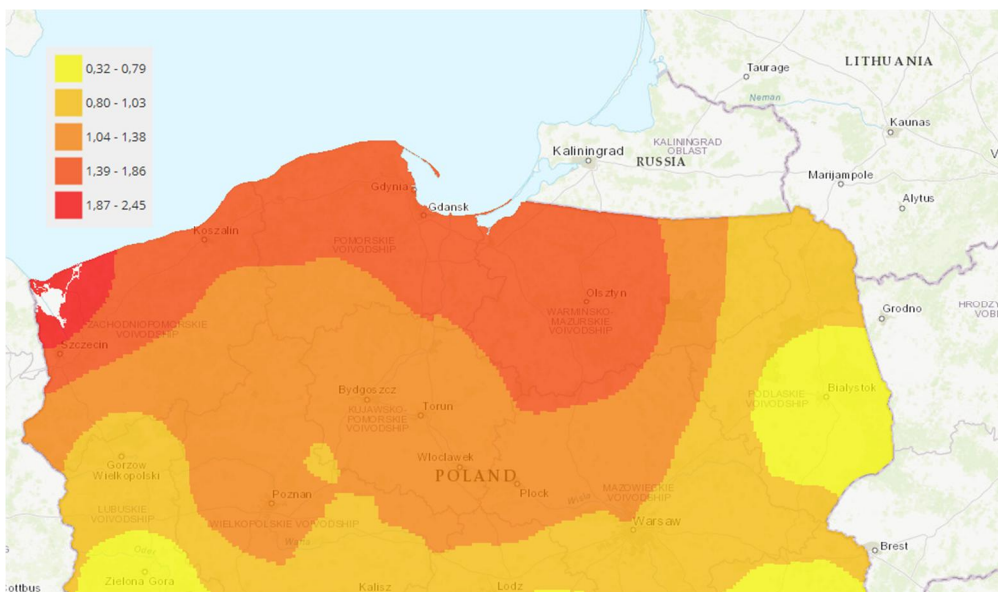


Rys. 5. Lokalizacja inwestycji.

Klimat i warunki atmosferyczne

Na terenie Miasta Świnoujście występuje klimat morski [1]. Charakteryzuje się on niższą roczną amplitudą temperatur niż klimat w innych częściach kraju. Zimy są łagodniejsze i mniej mroźne. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi około 9°C . Wahania siły i zmiany kierunku wiatru są dość znaczne. Średnia roczna prędkość wiatru wynosi około 4 m/s .

Przeważają silne wiatry zachodnie i południowo-zachodnie. Klimat charakteryzuje się dużą wilgotnością powietrza spowodowaną zawartością cząstek wody morskiej w powietrzu [1]. Średnia roczna wilgotność powietrza wynosi blisko 80%. Łączna liczba dni z opadem w skali roku wynosi około 170. Całkowita roczna suma opadów wynosi blisko 600 mm. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w opadach atmosferycznych wstępujących na terenie Świnoujścia odnotowywane jest najwyższe w kraju stężenie chlorków – patrz rys. 6



Rys. 6. Średnie roczne stężenie chlorków w opadach atmosferycznych [mg/dm^3] [Źródło: powietrze.gios.gov.pl, dane za rok 2016].

Dane dotyczące wysokiego stężenia anionów chlorkowych Cl^- w opadzie atmosferycznym znaleźć można również w raporcie o stanie geokosystemów w Polsce [2] przygotowywanym corocznie przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska w ramach programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Badania w ramach tego programu prowadzone są między innymi w Stacji Monitoringu Środowiska Przyrodniczego UAM w Białej Górze znajdującej się na wyspie Wolin, w gminie Międzyzdroje, na obszarze Wolińskiego Parku Narodowego oznaczonej symbolem 11ZM.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że stacja 11ZM w Białej Górze położona jest w niewielkiej odległości od Świnoujścia ~14 km. Odległość stacji monitoringu od linii brzegowej wynosi nieznacznie powyżej 300 metrów, czyli jest bardzo zbliżona do odległości jaka dzieli linię brzegową od Promenady Zdrowia w Świnoujściu. Tym samym, wyniki pomiarów w stacji praktycznie w pełni odpowiadają warunkom występującym na terenie inwestycji będącej przedmiotem niniejszego referatu. W rozdziale dotyczącym depozycji atmosferycznej raportu [2] przeczytać można, że średnie roczne stężenie chlorków w opadach atmosferycznych w stacji Biała Góra (wyspa Wolin) wynosi $3,12 \text{ mg}/\text{dm}^3$. Wartość ta sklasyfikowana została jako wartość podwyższona. Znaczący poziom stężenia jonów chlorkowych w opadzie atmosferycznym to konsekwencja położenia stacji w strefie bezpośredniego oddziaływania Bałtyku. Wysokie stężenie jonów chlorkowych i sodu w opadzie atmosferycznym związane jest z aerozolami pochodzenia morskiego.

Zanieczyszczenie powietrza dwutlenkiem siarki SO₂ na terenie miasta Świnoujście nie jest duże. Zgodnie z raportem [3] stężenie dobowe dwutlenku siarki a co za tym idzie również średnie stężenie roczne w północnych rejonach województwa zachodniopomorskiego nie przekracza wartości 5 mg/m³.

5. Ustalenie wielkości prognozowanego ubytku korozyjnego

We wcześniejszych rozdziałach referatu ogólnie scharakteryzowano problem korozji atmosferycznej stali, przedstawiono wytyczne normowe oraz przeanalizowano dane literaturowe na temat oceny korozyjności atmosfery.

Zgodnie z normą [15] wielkość prognozowanych ubytków korozyjnych można wyznaczać z wykorzystaniem równania dawka-odpowiedź. Zdecydowano się, wykorzystując dane ustalone w trakcie oceny warunków klimatycznych na terenie inwestycji oraz dane literaturowe, w szczególności dane krajowe pochodzące z badań przedstawionych w [5], oszacować prognozowane ubytki korozyjne. W trakcie obliczeń przyjęto następujące założenia:

$T = 9^{\circ}C$ – średnia roczna temperatura, stopnie Celsjusza [$^{\circ}C$],

$RH = 80\%$ – średnia roczna wilgotność względna, procenty [%],

$P_d = 4 \frac{mg}{m^2d}$ – średnia roczna depozycja SO₂ [mg/(m²d)],

$S_d = 144 \frac{mg}{m^2d}$ – średnia roczna depozycja Cl⁻ [mg/(m²d)].

UWAGA:

– wartości dla ditlenku siarki SO₂ określane metodą depozycji P_d i metodą objętościową P_c są w przypadku normy [15] równoważne. Zależności między pomiarami wykonanymi przy użyciu obu metod mogą być w przybliżeniu wyrażane jako $P_d = 0,8P_c$, gdzie P_d wrażane jest w [mg/(m²d)] a P_c w [mg/m³].

– wartości dla depozycji jonów chlorkowych silnie zależą od odległości od brzegu morskiego co wykazano w wielu pracach wskazanych wcześniej. Wartości w odległości do kilkuset metrów od brzegu morza mogą być kilku lub kilkunastokrotnie większe od wartości ustalonych w odległości kilku kilometrów. Promenada zdrowia położona jest w odległości zaledwie 200 metrów od brzegu morza. Do obliczeń przyjęto pięciokrotność depozycji chlorków Cl⁻ ustalonych dla miejscowości Żarnowiec położonej w odległości około 5 km od brzegu morskiego, czyli $5 \cdot 28,7 = 144$ mg/(m²d).

Równania dawka-odpowiedź dla stali węglowej:

$$f_{St} = 0,150(T - 10) = 0,150(9 - 10) = -0,15$$

$$r_{corr} = 1,77 \cdot P_d^{0,52} \cdot \exp(0,020 \cdot RH + f_{St}) + 0,102 \cdot S_d^{0,62} \cdot \exp(0,033 \cdot RH + 0,040 \cdot T)$$

$$r_{corr} = 1,77 \cdot 4^{0,52} \cdot \exp(0,020 \cdot 80 - 0,15) + 0,102 \cdot 144^{0,62} \cdot \exp(0,033 \cdot 80 + 0,040 \cdot 9)$$

$$r_{corr} = 60,1 \frac{\mu m}{a} = 480 \frac{g}{m^2 a}$$

Należy zauważyć, że wielkość ubytku silnie zależy wielkości depozycji jonów chlorkowych. Przyjęcie S_d jako dziesięciokrotności depozycji w Żarnowcu, czyli około 287 mg/(m²d) powoduje, że wielkość prognozowanego ubytku rośnie do poziomu:

$$r_{corr} = 84 \frac{\mu m}{a} = 672 \frac{g}{m^2 a}$$

6. Ustalenie kategorii korozyjności atmosfery

Wyznaczone w poprzednim rozdziale wielkości prognozowanych ubytków korozyjnych r_{corr} należy porównać z wielkościami granicznymi określonymi w normach [14] oraz [15].

Kategoria korozyjności	Ubytek masy na jednostkę powierzchni/ubytok grubości (po pierwszym roku ekspozycji)				Przykłady typowych środowisk (tylko informacyjnie)	
	Stal niskowęglowa		Cynk		Na zewnątrz	Wewnątrz
	Ubytek masy g/m ²	Ubytek grubości μm	Ubytek masy g/m ²	Ubytek grubości μm		
C4 duża	> 400 do 650	> 50 do 80	> 15 do 30	> 2,1 do 4,2	Obszary przemysłowe i obszary przybrzeżne o umiarkowanym zasoleniu	Zakłady chemiczne, pływalnie, stocznie remontowe statków i łodzi
C5 bardzo duża	> 650 do 1 500	> 80 do 200	> 30 do 60	> 4,2 do 8,4	Obszary przemysłowe o dużej wilgotności i agresywnej atmosferze i obszary przybrzeżne o dużym zasoleniu	Budynki lub obszary z prawie ciągłą kondensacją i dużym zanieczyszczeniem

Rys. 7. Ustalenie kategorii korozyjności atmosfery na podstawie r_{corr} .

Przy założeniu poziomu depozycji chlorków jako pięciokrotności wielkości pomierzonej w Żarnowcu, roczny ubytek korozyjny wynosi $r_{corr} = 480 \text{ g/m}^2$ i mieści się w przedziale od 400 do 650 g/m^2 , co oznacza, że kategoria korozyjności atmosfery na terenie inwestycji zlokalizowanej w odległości około 200 metrów od brzegu to:

C4 – duża korozyjność

Należy jednak zauważyć, że tak wyznaczony poziom depozycji chlorków może być zdecydowanie za mały biorąc pod uwagę bliskość linii brzegowej. Przy założeniu dziesięciokrotności depozycji ustalonej w Żarnowcu co daje r_{corr} o wartości 672 g/m^2 na rok, kategoria korozyjności atmosfery to:

C5 – bardzo duża korozyjność

Precyzyjne określenie wielkości ubytków korozyjnych r_{corr} możliwe byłoby po przeprowadzeniu badań na standardowych próbkach metali (stali węglowej, cynku, miedzi, aluminium) wg postanowień rozdziału siódmego normy [15].

Precyzyjne określenie wielkości S_d tj. depozycji jonów chlorkowych Cl^- możliwe byłoby doświadczalnie z wykorzystaniem metody mokrej świecy opisanej normie ISO 9225. Uściślenie tej wielkości pozwoliłoby na dokładniejsze określenie prognozowanych ubytków korozyjnych r_{corr} .

7. Podsumowanie

Przedstawiona w referacie analiza pozwala na wyciągnięcie wniosków:

- atmosferę na terenie inwestycji należy sklasyfikować jako typową atmosferę morską, cechującą się wysoką wilgotnością jak również wysokim stężeniem jonów chlorkowych Cl^- pochodzących z aerozolu morskiego,
- atmosfera na terenie inwestycji jest wysoce agresywna o czym świadczyć może chociażby fakt, że pierwsze oznaki korozji pojawiły się na przedmiotowej konstrukcji już kilka miesięcy (możliwe, że kilka tygodni) po jej wykonaniu;

- zaprojektowana konstrukcja pełni głównie funkcje estetyczne i reprezentacyjne. Wymaga się od niej, oprócz bezpieczeństwa również nieskazitelnego wyglądu co pozwoli na spełnienie postanowień stanu granicznego użyteczności określonego w PN-EN 1990,
- przeprowadzone studia literaturowe, analiza danych środowiskowych oraz przeprowadzone obliczenia pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że na potrzeby wykonania zabezpieczenia antykorozyjnego konstrukcji powinna być przyjęta kategoria korozyjności atmosfery C4 lub C5, czyli o dużej lub bardzo dużej korozyjności. Precyzyjne określenie kategorii korozyjności możliwe byłoby po przeprowadzeniu dodatkowych badań określających wielkość depozycji jonów chlorkowych na terenie inwestycji (patrz ISO 9225) lub na podstawie pomiaru ubytków korozyjnych na standardowych próbkach metali (patrz ISO 9226),
- podobne wnioski na temat oceny korozyjności atmosfery wyciągnąć można na podstawie analizy postanowień normy dotyczącej projektowania konstrukcji ze stali nierdzewnej [16, 17] wg której konstrukcje zlokalizowane w odległości nieprzekraczającej 250 metrów od linii brzegowej Bałtyku narażone są na bardzo wysokie ryzyko oddziaływania chlorków ze słonej wody w związku z czym należy je projektować ze stali nierdzewnej o klasie odporności korozyjnej CRC przynajmniej III,
- przyjęcie zbyt niskiej klasy korozyjności może doprowadzić do przyspieszonej korozji i tym samym skrócenia założonego okresu użytkowania konstrukcji. W konsekwencji zwiększeniu ulegną nakłady finansowe na utrzymanie właściwego stanu technicznego a w szczególności wyglądu obiektu.

Literatura

1. Program Ochrony Środowiska dla Miasta Świnoujście na lata 2016–2019 z perspektywą na lata 2020–2023. Greenkey Rozwiązania dla środowiska. Styczeń, 2017 r.
2. Raport o stanie geosystemów Polski w roku 2009. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, <https://www.gios.gov.pl>.
3. Roczna ocena jakości powietrza w województwie zachodniopomorskim. Raport wojewódzki za rok 2019. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Departament Monitoringu Środowiska. Regionalny Wydział Monitoringu Środowiska w Szczecinie. Szczecin 2020 r.
4. Głuszko M.: Zagadnienia ochrony antykorozyjnej konstrukcji stalowych oraz urządzeń elektroenergetycznych eksploatowanych w warunkach atmosferycznych. Sieć Badawcza Łukasiewicz – Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 235, 2008.
5. Głuszko M.: Korozja atmosferyczna konstrukcji stalowych i stalowych ocynkowanych w otoczeniu elektrowni węglowych. Metody ochrony. IV Seminarium Naukowo-Techniczne Zakopane, s. 20, 18–20 czerwca 1997.
6. Głuszko M.: Ocena narażeń środowiskowych i ocena uszkodzeń konstrukcji stalowych i stalowych ocynkowanych. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Dokumentacja Techniczna Nr RB/DP/46/96, Warszawa, 1997.
7. Alcantara J., de la Fuente D., Chico B., Simancas J., Diaz I. and Morcillo M.: Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel: A Review. *Materials* 2017, 10, 406; doi:10.3390/ma10040406.
8. Gustafsson M. E. R., Franzen L. G.: Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden. *Atmospheric Environment* Vol. 30, No. 6, pp. 977–989, 1996.
9. Haberecht P. W.: Pollution Deposition Rates on Insulator (HV) Surfaces for use in Atmospheric Corrosivity Estimation. Thesis, Doctor of Philosophy, The University of Newcastle, September 2008.
10. Hernández A.: Impact of environmental pollution in the historical buildings of Havana, Cuba. Effect of future climate change. *Revista Ingeniería de Construcción RIC* Vol 33 N°3 2018.
11. Corvo F., Perez T., Dzib L.R., Martin Y., Castaneda A., Gonzalez E., Perez J.: Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. *Corrosion Science* 50 (2008) 220–230.
12. Somay A. M., Gemici U., Filiz S.: Hydrogeochemical investigation of Kucuk Menderes River coastal wetland, Selcuk–Izmir, Turkey. *Environmental Geology*, July 2007.

13. Meira G.R., Andrade C., Alonso C., Padaratz I.J., Borba J.C.: Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone – A tool for corrosion studies. *Corrosion Science* 50 (2008) 2724–2731.
14. PN-EN ISO 12944-2 Farby i lakiery. Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich. Część 2: Klasyfikacja środowisk.
15. PN-EN ISO 9223 Korozja metali i stopów. Korozyjność atmosfer. Klasyfikacja, określenie i ocena.
16. PN-EN 1993-1-4 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-4: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji ze stali nierdzewnych.
17. Zmiana do Polskiej Normy PN-EN 1993-1-4:2007/A1:2015-08 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-4: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji ze stali nierdzewnych.

Corrosion of steel structures located in the coastal belt – contribution to the discussion on methods of determining the corrosivity category of the atmosphere

Key words: corrosion of metals, chloride deposition, atmospheric corrosivity category