

Ocena korozyjności atmosfery na podstawie ubytków korozyjnych próbek wzorcowych na terenie wybranych wojskowych baz lotniczych

Atmospheric corrosivity assessment on the basis of standard samples' corrosion rates within the military air bases



Aleksandra Pajurek

Mgr inż.

Instytut Techniczny Wojsk
Lotniczych



Paweł Iwanowski

Mgr inż.

Instytut Techniczny Wojsk
Lotniczych

pawel.iwanowski@itwl.pl



Danuta Kowalska

Mgr inż.

Instytut Techniczny Wojsk
Lotniczych

danuta.kowalska@itwl.pl

Streszczenie: Korozja atmosferyczna to jeden z parametrów charakteryzujących stan techniczny elementów funkcjonalnych nawierzchni lotniskowych - pozwala określać stopień zdegradowania nawierzchni, szacować odpowiednią częstotliwość wykonywania przeglądów okresowych i podejmować odpowiednie środki, aby utrzymać nawierzchnie lotniskowe w stałym stanie gotowości technicznej. W celu określenia odporności korozyjnej nawierzchni lotniskowych wykonanych w technologii betonu cementowego i betonu asfaltowego, prowadzone są badania korozyjności atmosfery, oznaczanej na podstawie ekspozycji próbek standardowych materiałów i określeniu wielkości ubytków korozyjnych, ich postaci oraz wyglądu, a także zmian właściwości fizycznych w regularnych odstępach czasu. Próbkę wystawiono na oddziaływanie warunków atmosferycznych na terenie wojskowych obiektów lotniskowych. W artykule przedstawiono wyniki ubytków korozyjnych $rcorr$ próbek standardowych ze stali niskowęglowej, cynku, miedzi i aluminium pozyskanych z wybranych lotnisk Sił Zbrojnych RP, począwszy od 2015 roku. Następnie określono kategorie korozyjności atmosfery na podstawie przeprowadzonych pomiarów.

Słowa kluczowe: Korozja atmosferyczna; Ubytki korozyjne; Próbkę standardowe; Wojskowe bazy lotnicze

Abstract: Atmospheric corrosion is one of the parameters characterizing the technical condition of the functional elements of airport pavements - it allows to determine the degree of pavement degradation, estimate the appropriate frequency of periodic inspections and take appropriate measures to keep airfield pavements in permanent technical availability. In order to determine the corrosion resistance of the cement and asphalt concrete airfield pavement, atmospheric corrosivity tests determined on the basis of standard specimens exposure and determination of corrosion rates, form and appearance of deteriorations, as well as changes in physical properties at regular intervals are carried out. The samples were exposed to atmospheric conditions at military airport facilities. The article presents the $rcorr$ corrosion rate results of low-carbon steel, zinc, copper and aluminum standard samples obtained from selected airports of the Polish Armed Forces, starting from 2015. Then, the corrosivity categories of the atmosphere were determined on the basis of the performed measurements.

Keywords: Atmospheric corrosion; Corrosion rate; Standard specimens; Military air bases

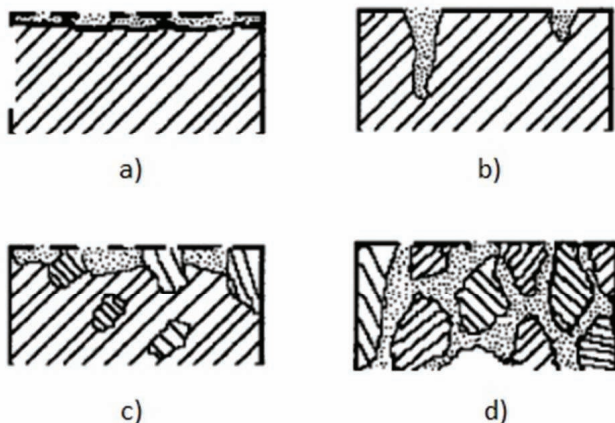
Wstęp

Korozja atmosferyczna to oddziaływanie fizykochemiczne między metalem i środowiskiem miejsca badań korozji atmosferycznej. Podczas korozji atmosferycznej na powierzchni metalu zachodzą równocześnie dwa procesy: anodowy i katodowy. W procesie anodowym następuje utlenianie metalu. Z kolei przebieg reakcji katodowej zależy od pH środowiska - w środowisku kwaśnym następuje katodowa redukcja jonów wodorowych z wydzielaniem wodoru, natomiast w środowisku obojętnym i zasadowym następuje

katodowa redukcja tlenu w roztworze wodnym z utworzeniem jonów wodorotlenowych [1].

Określanie szybkości korozji przy użyciu ubytków korozyjnych sugeruje, że korozja zachodzi równomiernie na powierzchni całej próbki [2]. Na wczesnym etapie ekspozycji szybkość korozji jest stosunkowo wysoka. Ponieważ produkty korozji gromadzą się na powierzchni metalu, szybkość korozji stopniowo spada i ma tendencję do pozostawania na stałym poziomie [3, 4]. Badania korozyjne w warunkach ekspozycji atmosferycznej prowadzone są na całym świecie i są stałym przedmiotem

badania wśród badaczy. Międzynarodowy program badawczy ISO CORRAG (Collaborative Atmospheric Exposure Program) [5] prowadzony jest w celu określenia stopnia korelacji pomiędzy czterema użytymi metalami (stal węglowa, cynk, miedź i aluminium) w 13 krajach na całym świecie w trakcie 8 letniej ekspozycji próbek. Temperatura, wilgotność względna, stężenie dwutlenku siarki, szybkość osadzania chlorków i inne czynniki środowiskowe są monitorowane i rejestrowane przez cały okres ekspozycji. Czas ekspozycji próbek w wymiarze 8 lat przyjęto również w projekcie UN/ECE [6], w którym



1. Przykłady korozji powierzchniowej występującej na powierzchni metali:

a) korozja ogólna, b) korozja lokalna, c) korozja selektywna, d) korozja międzykrystaliczna



2. Przykładowa stacja korozyjna zlokalizowana na jednym z obiektów lotniskowych

to w 12 krajach europejskich, Stanach Zjednoczonych i Kanadzie oceniano szybkość korozji próbek wykonanych ze stali, cynku, aluminium, miedzi, wapienia, piaskowca i innych materiałów. Autorzy [7] zestawili i ocenili bazy danych korozyjnych pozyskanych w ramach programów ISOCORRAG, ICP/UNECE i MICAT, dokonując podziału atmosfer na morską i nie morską. Depozycja chlorków na obszarach przybrzeżnych w dużym stopniu zależy od czynników wpływających na przedstawianie się w głąb lądu soli morskiej, tj. kierunek i prędkość wiatru, lokalna topografia, odległość od morza. Dlatego też, jedna z predysponowanych ekspozycji próbek korozyjnych znajduje się na obszarach nadmorskich [8, 9, 10, 11]. System oceny korozji atmosferycznej może również wesprzeć proces zarządzania elementami funkcjonalnymi lotnisk (wojskowych i cywilnych) oraz wspomóc racjonalne zarządzanie nawierzchniami lotniskowymi. Autorzy [12, 13, 14] dysponując wynikami badań próbek wzorcowych, wyznaczając korelacje z parametrami charakteryzującymi warunki atmosferyczne mają na celu ograniczenie zbierania danych środowiskowych, a ich oddziaływanie określać na podstawie ubytków korozyjnych próbek wzorcowych.

Rodzaje korozji oraz czynniki korozyjne

Korozja atmosferyczna może występować w dwóch podstawowych formach:

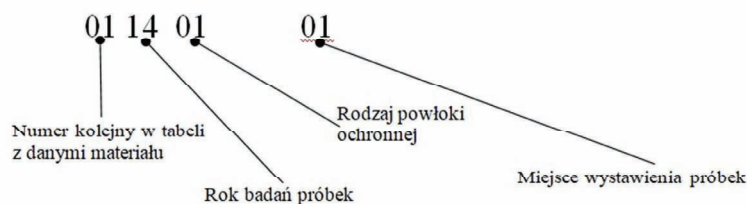
korozji ogólnej (równomiernej) i korozji lokalnej [15]. Korozja ogólna (równomierna) występuje z podobną szybkością i w tej samej postaci na całej powierzchni próbki. Ten rodzaj korozji jest typowy dla korozji atmosferycznej stali i miedzi [16]. Korozja lokalna występuje wybiórczo, w poszczególnych miejscach na powierzchni próbki. Można ją zaobserwować na stopach aluminium, cynku, stali nierdzewnej, niklu i innych metalach w postaci korozji wżerowej, szczelinowej i podosadowej. Często jest to wywołane obecnością jonów chlorowych, które występują w powietrzu środowisk morskich i przybrzeżnych. Miejscowe oddziaływanie korozji niektórych stopów aluminium, w tym tych zawierających miedź, może przybierać postać korozji warstwowej i efektu łuszczenia czy pęcherzenia. Ponadto, wyróżniamy korozję selektywną, czyli korozję stopu metalu (np. mosiądzu), którego składniki wchodzi w reakcje w innych proporcjach niż ich proporcje w stopie czy też korozję międzykrystaliczną występującą na granicach ziaren metalu lub w obszarach do nich przylegających. W przypadku gdy dwa lub więcej różnych metali jest w bezpośrednim kontakcie, w obecności elektrolitu, mamy do czynienia z korozją galwaniczną (bimetaliczną). Poszczególne rodzaje korozji przedstawiono na rysunku 1 [16].

Na powierzchnię próbek metali oddziałują czynniki korozyjne, tj. wilgotność powietrza, opady atmosferyczne, temperatura powietrza, a także zanie-

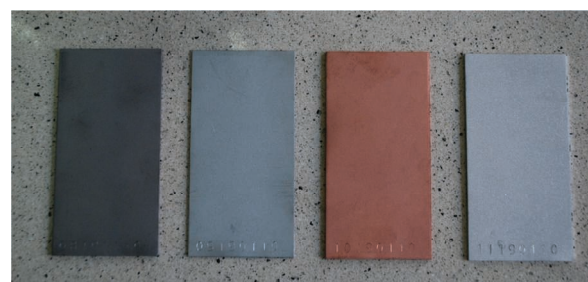
czyszczenia powietrza (w szczególności stężenie dwutlenku siarki (SO_2), tlenków azotu (NO_x), pyły zawieszone PM, kwas azotowy (HNO_3) oraz zanieczyszczenia eksploatacyjne i technologiczne mikroklimatu, tj. chlor (Cl_2), siarkowodor (H_2S), kwasy organiczne i środki do odladzania). Proces korozji jest uzależniony od obecności elektrolitu, czyli medium w którym prąd elektryczny przenoszony jest przez jony. Może nim być deszcz, rosa, topniejący śnieg czy też wysoka wilgotność. Korozja atmosferyczna ma miejsce w warunkach wysokiej wilgotności względnej (tzw. krytycznej wilgotności względnej), poniżej której zwykle metale nie korodują, ponieważ nie ma wystarczającej ilości wilgoci, aby utworzyć warstwę elektrolitu na powierzchni metalu. Jednakże, wg [17] powierzchnie wystawione na oddziaływanie deszczu charakteryzują się lepszą odpornością korozyjną niż powierzchnie rzadko lub wcale opukiwane przez deszcz. Wg Cai, Y. K. i in. [18] wpływ różnych czynników środowiskowych na szybkość korozji metali jest zwykle nieliniowy.

Badania korozji atmosferycznej

Badania korozyjne zostały przeprowadzone w warunkach eksploatacyjnych statków powietrznych w wybranych bazach lotniczych, w celu określenia odporności na korozję metali oraz korozyjności atmosfery. Zastosowano ekspozycję próbek na otwartej przestrzeni, gdzie czynniki atmosferyczne i zanie-



3. Schemat oznakowania próbek wzorcowych



4. Próbk wzorcowe po zabiegu piaskowania powietrznego oraz ich oznakowaniu

czyszczenia atmosfery oddziałują bezpośrednio na powierzchnię próbek [19]. Ramy do ekspozycji próbek metali znajdują się w obrębie stacji korozyjnych, czyli specjalnie ogrodzonych miejscach (celem zabezpieczenia przed możliwością zniszczenia badanych obiektów). Obecność budynków, jakichkolwiek konstrukcji w bezpośrednim sąsiedztwie stacji jest niedopuszczalne ponieważ stanowią one osłonę dla badanych próbek. Dlatego też stanowiska ekspozycyjne są zlokalizowane w miejscach odosobnionych, w których powierzchnia próbek jest bezpośrednio wystawiona na działanie wszystkich czynników pogodowych. Jakakolwiek roślinność dookoła stanowiska jest wycinana lub skracana do wysokości 0,2 m. Ramy do ekspozycji zabezpieczono przed ich niepożądanym przemieszczaniem poprzez przymocowanie ich podstaw kołkami rozporowymi do betonowych wylewek. Specjalne uchwyty do mocowania próbek służą do zabezpieczenia badanych próbek przed przemieszczaniem się. Na fotografii 2 przedstawiono zdjęcie przykładowej stacji korozyjnej postawionej na jednym z obiektów lotniskowych.

Próbki standardowe są płytkami o wymiarach 50 mm x 100 mm i grubości w zależności od dostępnych na rynku grubości blach w zakresie od 1 mm do 3 mm.

Próbki wzorcowe są próbkami jednorocznymi nie zabezpieczonymi, jakimikolwiek preparatami antykorozyjnymi. Próbkę przeznaczoną do badań wykonano z arkuszy płaskich blach. W celu identyfikacji, stworzono schemat znakowania próbek poprzez wybijanie sekwencji cyfr, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3. Pierwsze dwie cyfry stanowią oznaczenie materiału, z jakiego wykonano próbkę (08 – stal węglowa, 09 – cynk, 10 –

miedź, 11 – aluminium). Kolejne dwie cyfry oznaczają rok badań (wystawienia) próbek na stację korozyjną. Próbk wzorcowe są próbkami jednorocznymi, nie zabezpieczonymi jakimikolwiek preparatami antykorozyjnymi, w związku z tym na próbkach wytłacza się cyfry 01, co oznacza również, iż należy je zdjąć z ramy po jednym roku prowadzenia badań (wystawienia na działanie warunków atmosferycznych). Ostatnie dwie cyfry stanowią miejsce wystawienia próbek (każda z baz lotniskowych, na których zlokalizowana jest stała stacja korozyjna ma przypisany swój indywidualny numer). Po oznakowaniu próbek, sporządzono wykaz zawierający identyfikację próbek. Na fotografii 4 przedstawiono próbki wzorcowe po zabiegu piaskowania powietrznego oraz ich oznakowaniu.

Próbki przygotowano według normy PN-EN ISO 8565:2021. Za przygotowanie i wystawienie próbek na stanowiska badawcze oraz późniejsze ich zwieźenie odpowiedzialni byli pracownicy Zakładu Lotniskowego ITWL. Przed ekspozycją, wszystkie próbki standardowe zostały odtłuszczone z zastosowaniem rozpuszczalników organicznych lub odtłuszczających cieczy alkalicznych. W czasie zdejmowania próbek ze stacji korozyjnych wystawiono próbki na kolejny okres badawczy.

Próbki po przywiezieniu do laboratorium Zakładu Lotniskowego zostały zważone i zmierzone. Następnie usunięto produkty korozji metodą chemiczną według normy EN ISO 8407:2021 Korozja metali i stopów - Usuwanie produktów korozji z próbek do badań korozyjnych [20]. Kolejnym krokiem było ponowne zważenie i zmierzenie próbek. Próbkę ważono na wadze z dokładnością 0,001 g, natomiast pomiaru grubości wykonano

śrubą mikrometryczną o dokładności 0,001 mm. Grubość próbki mierzono w pięciu punktach.

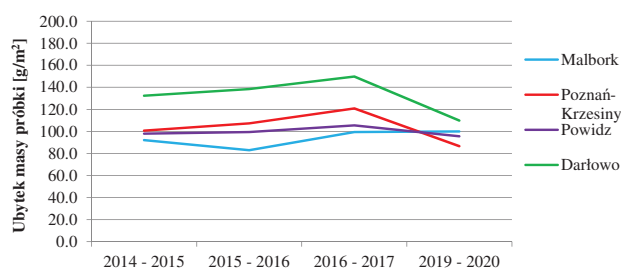
Ubytek masy próbki w przeliczeniu na jej powierzchnię obliczono według normy PN-EN ISO 9226:2012 Korozja metali i stopów - Korozyjność atmosfery - Ocena korozyjności na podstawie określenia szybkości korozji w próbkach standardowych [21].

Pomiar ubytków korozyjnych próbek standardowych

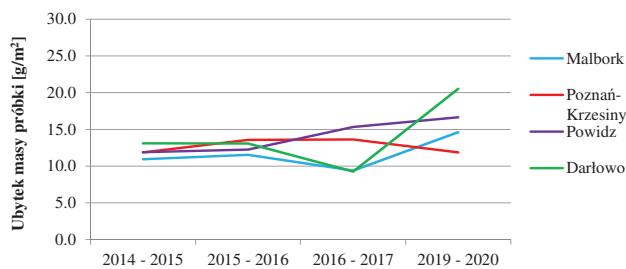
Zakład Lotniskowy ITWL prowadzi badania korozji atmosferycznej począwszy od października 2014 roku do dnia dzisiejszego. Zbiór danych korozyjnych obejmuje okresy ekspozycji rocznej w latach 2014 – 2015, 2015 – 2016, 2016 – 2017 oraz 2019 – 2020, a także jeden okres ekspozycji dwuletniej w latach 2017 – 2019. W poniższym artykule przedstawiono dane pozyskane ze stałych stacji korozyjnych zlokalizowanych na terenie 22 Bazy Lotnictwa Taktycznego w Malborku, 31 Bazy Lotnictwa Taktycznego w Poznaniu – Krzesinach, 33 Bazy Lotnictwa Transportowego w Powidzu oraz Grupy Lotniczej w Darłowie. Na wykresach (rysunki 5 – 8) przedstawiono określone wartości ubytków korozyjnych próbek standardowych poszczególnych metali z podziałem na poszczególne obiekty.

Z powyższych zestawień wynika, że:

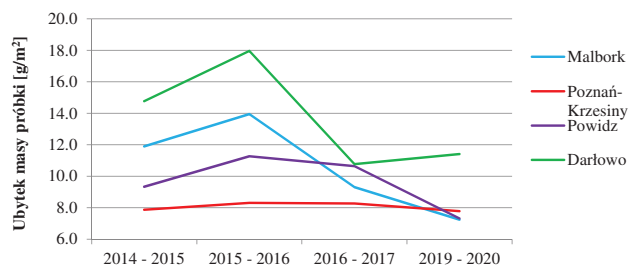
- najwyższe wartości ubytków korozyjnych r_{corr} stali węglowej zostały zarejestrowane w 2017 roku, najniższe – w 2020 (Poznań – Krzesiny, Powidz, Darłowo) i 2016 roku (Malbork),
- najwyższe wartości ubytków korozyjnych r_{corr} cynku zostały zarejestrowane w 2017 (Poznań – Krzesiny i Powidz) oraz 2020 roku



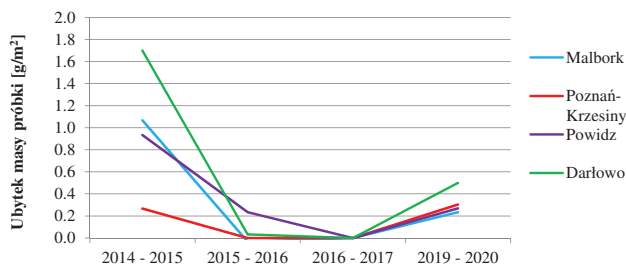
5. Ubytki masy próbek wzorcowych wykonanych ze stali węglowej w poszczególnych latach



6. Ubytki masy próbek wzorcowych wykonanych z cynku w poszczególnych latach



7. Ubytki masy próbek wzorcowych wykonanych z miedzi w poszczególnych latach



8. Ubytki masy próbek wzorcowych wykonanych z aluminium w poszczególnych latach

(Malbork i Darłowo), najniższe – w 2017 (Malbork, Darłowo) oraz 2015 roku (Poznań – Krzesiny, Powidz),

- najwyższe wartości ubytków korozyjnych r_{corr} miedzi zostały zarejestrowane w 2016 roku na wszystkich analizowanych stacjach korozyjnych, najniższe wartości ubytków r_{corr} zarejestrowano w 2020 (Malbork, Poznań – Krzesiny, Powidz) oraz 2017 roku (Darłowo),
- najwyższe wartości ubytków korozyjnych r_{corr} aluminium zostały zarejestrowane w 2015 roku na wszystkich analizowanych stacjach korozyjnych, najniższe wartości ubytków r_{corr} zarejestrowano w 2017 roku (również na wszystkich stacjach korozyjnych).

Korozyjność atmosfery

Kategoria korozyjności atmosfery stanowi podstawę doboru materiałów i środków do ochrony w warunkach atmosferycznych, szczególnie w odniesieniu do okresu użytkowania, w tym też użytkowania nawierzchni lotniskowych. W niniejszej pracy, wykorzystany został system klasyfikacji korozyjności atmosfery na podstawie pomiaru ubytków korozyjnych standardowych próbek po pierwszym roku ekspozycji według normy PN-EN ISO 9223:2012 Korozja metali i stopów - Korozyjność atmosfer - Klasyfikacja, określanie i ocena [22]. W tab. 1 – 4 przedstawiono ka-

tegorie korozyjności określone na podstawie ubytków korozyjnych po 1 roku ekspozycji próbek na oddziaływanie korozji atmosferycznej.

Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytków korozyjnych (g/m^2) próbek wzorcowych metali są rozbieżne, wskazują na ścisłą zależność kategorii korozyjności od lokalnych warunków klimatycznych oraz stężeń zanieczyszczeń w powietrzu.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono rodzaje korozji występującej na powierzchni metali, a także czynniki korozyjne, które mają bezpośredni wpływ na szybkość korozji. Następnie, opisano wymagania dotyczące miejsc ekspozycji próbek standardowych metali w obrębie stałych stacji korozyjnych znajdujących się na terenie baz lotniczych Sił Zbrojnych RP oraz procedurę przygotowywania i postępowania z próbkami standardowymi metali (stal węglowa, cynk, miedź i aluminium). Przedstawiono również wyniki badań ubytków korozyjnych r_{corr} zarejestrowanych na stacjach korozyjnych w latach 2015 – 2020, znajdujących się na terenie wybranych baz lotniczych. Określono również kategorie korozyjności atmosfery na podstawie wartości ubytków korozyjnych r_{corr} po jednorocznej ekspozycji próbek.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na potrzebę prowadzenia

regularnych testów korozyjnych w warunkach polowych w celu uzyskania rzeczywistych danych na temat trwałości metali i ich degradacji w różnych typach środowiska, rozszerzonych o badania laboratoryjne metali i ich stopów, tj. badania korozyjne w rozpylonej solance. Ponadto, zaleca się zwiększenie wielkości próby dostępnych danych korozyjnych w celu zwiększenia możliwości interpretacji otrzymanych wyników. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Głuszko M. Korozja atmosferyczna konstrukcji stalowych i stalowych - ocynkowanych w otoczeniu zakładów przemysłu chemicznego. Metody ochrony, Ochrona przed Korozją, 1998.
- [2] Sun B., Zuo H. M., Cheng X. Q., LiThe X. G. The role of chromium content in the long-term atmospheric corrosion proces, Npj Mater. Degrad., 2020.
- [3] Cui, Z.Y., Li, X.G., Xiao, K., Dong, C.F., Liu, Z.Y., Zhang, D.W. Atmospheric corrosion behaviour of pure Al 1060 in tropical marine environment. Br. Corros., 2015.
- [4] Lv, W.Y., Pan, C., Su, W., Wang, Z.Y., Liu, S.N., and Wang, C. A study on atmospheric corrosion of 304 stainless steel in asimulated marine atmosphere. J. Mater. Eng. Perform., 2015.

Tab. 1. Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytku masy próbek wykonanych ze stali węglowej

Stacja korozyjna	Stal węglowa							
	2014 - 2015		2015 - 2016		2016 - 2017		2019 - 2020	
	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności
Malbork	92,1	C2	82,9	C2	99,5	C2	100,0	C2
Poznań-Krzesiny	100,7	C2	107,2	C2	120,8	C2	86,6	C2
Powidz	98,0	C2	99,4	C2	105,4	C2	95,6	C2
Darłowo	132,4	C2	138,4	C2	149,8	C2	109,8	C2

Tab. 2. Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytku masy próbek wykonanych z cynku

Stacja korozyjna	Cynk							
	2014 - 2015		2015 - 2016		2016 - 2017		2019 - 2020	
	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności
Malbork	10,9	C3	11,5	C3	9,4	C3	14,6	C3
Poznań-Krzesiny	11,9	C3	13,6	C3	13,6	C3	11,8	C3
Powidz	11,9	C3	12,2	C3	15,3	C4	16,6	C4
Darłowo	13,1	C3	13,1	C3	9,3	C3	20,5	C4

Tab. 3. Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytku masy próbek wykonanych z miedzi

Stacja korozyjna	Miedź							
	2014 - 2015		2015 - 2016		2016 - 2017		2019 - 2020	
	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności
Malbork	11,9	C3	13,9	C4	9,3	C3	7,2	C3
Poznań-Krzesiny	7,9	C3	8,3	C3	8,3	C3	7,8	C3
Powidz	9,3	C3	11,3	C3	10,6	C3	7,3	C3
Darłowo	14,8	C4	18,0	C4	10,8	C3	11,4	C3

Tab. 4. Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytku masy próbek wykonanych z aluminium

Stacja korozyjna	Aluminium							
	2014 - 2015		2015 - 2016		2016 - 2017		2019 - 2020	
	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności	r_{corr} g/m ²	Kategoria korozyjności
Malbork	1,1	C3	0,0	C2	0,0	C2	0,2	C2
Poznań-Krzesiny	0,3	C2	0,0	C2	0,0	C2	0,3	C2
Powidz	0,9	C3	0,2	C2	0,0	C2	0,3	C2
Darłowo	1,7	C3	0,0	C2	0,0	C2	0,5	C2

- [5] Knotkova, D., Dean, S.W., and Kreislova, K. ISO CORRAG International atmospheric exposure program: summary of results. ASTM International, 2010.
- [6] Tidblad, J. Atmospheric corrosion of metals in 2010–2039 and 2070–2099. Atmos. Environ., 2012.
- [7] Chico B., De la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Morcillo M. Annual

Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases, 2017.

- [8] Titakis C., Vassiliou P. Evaluation of 4-Year Atmospheric Corrosion of Carbon Steel, Aluminum, Copper and Zinc in a Coastal Military Airport in Greece, 2020.
- [9] Mendoza, A.; Corvo, F. Outdoor and

Indoor Atmospheric Corrosion of Non-Ferrous Metals. Corros. Sci., 2000.

- [10] Morcillo M., Alcántara J., Díaz I., Chico B., Simancas J., De la Fuente D. Marine atmospheric corrosion of carbon steels, 2015.
- [11] Melia M. A., Duran J., Taylor J. M., Presuel-Moreno F., Schaller R. F., Schindelhof E. J. Marine Atmospheric Corrosion of Additively Manufactured Stainless Steels, 2021.
- [12] Wesołowski M., Rumak A., Iwanowski P., Poświata A. Assessment of the Impact of Atmospheric Corrosivity on the Cement Concrete Airfield Pavement's Operation Process, Sustainability, 2020.
- [13] Wesołowski M., Iwanowski P.: APCI Evaluation Method for Cement Concrete Airport Pavements in the Scope of Air Operation Safety and Air Transport Participants Life, Int. J. Environ. Res. Public Health, 2020.
- [14] Wesołowski M., Iwanowski P.: Evaluation of asphalt concrete airport Pavement conditions based on the Airfield Pavement Condition Index (APCI) in Scope of flight safety, Aerospace, 2020.
- [15] EN ISO 8044:2020 Korozja metali i stopów - Terminologia.
- [16] Veleza L., Kane R. D. Atmospheric Corrosion, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, 13 A, 2003.
- [17] Vargel C. Corrosion of aluminium. Second Edition, 2020.
- [18] PN-EN ISO 8565:2021 Metale i stopy - Badania korozji atmosferycznej - Wymagania ogólne.
- [19] Cai, Y.K., Zhao, Y., Ma, X.B., and Zhou, K., Chen, Y. Influence of environmental factors on atmospheric corrosion in dynamic environment. Corros. Sci., 2018.
- [20] PN-EN ISO 8407:2021 Korozja metali i stopów - Usuwanie produktów korozji z próbek do badań korozyjnych.
- [21] PN-EN ISO 9226:2012 Korozja metali i stopów - Korozyjność atmosfer - Ocena korozyjności na podstawie określenia szybkości korozji w próbkach standardowych.
- [22] PN-EN ISO 9223:2012 Korozja metali i stopów - Korozyjność atmosfer - Klasyfikacja, określanie i ocena.