



Aleksandra PAJUREK ORCID 0000-0001-7045-2633,
aleksandra.pajurek@itwl.pl – corresponding author
Danuta KOWALSKA ORCID 0000-0003-1903-9960, danuta.kowalska@itwl.pl
Adam POŚWIATA adam.poswiata@itwl.pl
Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych), Poland

ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC CORROSIVITY BASED ON EXPOSURE OF CONCRETE AIRFIELD PAVEMENT SAMPLES

Ocena korozyjności atmosfery na podstawie ekspozycji próbek pobranych z betonowej nawierzchni lotniskowej

Abstract: *Many research areas focus on atmospheric corrosion based on the exposure of material samples, monitoring them periodically, and determining their size at fixed time intervals. The article presents an innovative approach to the atmospheric corrosion affecting the pavement, specifically the cement concrete samples. Tests in natural conditions involve the corrosion resistance assessment of specially prepared samples of the tested material in natural atmospheric conditions at a given airport facility. The manuscript proposes an atmospheric corrosion assessment method.*

Keywords: atmospheric corrosion, cement concrete, airfield pavement

Streszczenie: *Badania korozji atmosferycznej na podstawie ekspozycji próbek materiałów i poddawania ich okresowym obserwacjom oraz oznaczania w ustalonych odstępach czasu charakteryzujących ich wielkości są przedmiotem zainteresowania w wielu obszarach nauki. W artykule przedstawione zostało innowacyjne podejście do zagadnienia korozji atmosferycznej oddziałującej na nawierzchnię z betonu cementowego. Badania w warunkach naturalnych polegają na sprawdzeniu odporności na korozję specjalnie przygotowanych w tym celu próbek badanego materiału, w tym przypadku w naturalnych warunkach atmosferycznych występujących na terenie danego obiektu lotniskowego. W pracy zaproponowano metodę oceny wpływu korozji atmosferycznej.*

Słowa kluczowe: korozja atmosferyczna, beton cementowy, nawierzchnia lotniskowa

Received: April 15, 2024/ Revised: May 11, 2024/ Accepted: June 05, 2024/ Published: June 28, 2024



1. Introduction

It is a well-established fact, confirmed by numerous research results, that the atmospheric corrosivity of metals at a location can be tens or even hundreds of times greater than at another location [1, 2]. Therefore, it is absolutely necessary to conduct in-service testing under natural conditions, as it is impossible to replicate the actual, constantly changing atmospheric laboratory conditions at the site of sample exposure. Atmospheric corrosion tests are carried out in variety environmental settings such as urbanized [3] or coastal [4], and utilize non-standard, carefully chosen exposure samples [5]. The authors of this manuscript have so far focused their atmospheric corrosion research on determining the corrosion losses of standard samples, which are rectangular, flat sheet samples of materials following EN ISO 8565 [6]. Modelling and prediction of atmospheric corrosion are addressed in many studies. Panchenko Yu.M. et al. [7] made predictions of corrosion loss values using a power function, in [8, 9], also a linear transformation (also for long-term predictions). In [10], the authors showed an algorithmic model for predicting the corrosivity of steel specimens. They also found the link between metal alloy, environmental factors, and the amount of corrosion loss (actual and estimated) using Pearson's correlation coefficient and the MIC (maximal information coefficient) method. Daneshian et al. [11] aimed to establish a connection between specific atmospheric parameters and the corrosivity of steel specimens following a year of exposure (using data from a single site to characterize the atmospheric parameters and corrosivity results of the exposed specimens).

According to the authors, including atmospheric corrosivity in the assessment of the technical condition of airfield pavements is necessary due to its undoubted influence on airfield pavement damage. If you look at the composition of airfield pavements or the number of airport operations, atmospheric corrosivity makes a strong case for including them in the assessment, or at least for determining the technical condition of airfield pavements [12]. Considering the influence of atmospheric corrosivity in the assessment of the technical condition of airfield functional elements will enable us to include factors related to the operational region of the airfield in question.

2. Research problem and research method

The technical condition of airfield pavements is assessed with the commonly applied Pavement Condition Index (PCI) method [13, 14]. It entails a visual assessment of the surface condition of the airfield pavement and a determination of its degradation degree. Another method for assessing the technical condition of airfield pavements is the APCI

(Airfield Pavement Condition Index) method [15], which enables a comprehensive assessment of the technical condition of airfield pavements [16].

In contrast to the PCI method, which is based on the results of surface damage surveys, the APCI method also includes inventoried pavement repairs as well as measurements of the deflections, anti-skid properties, evenness, and tensile bond strength of the surface layer. The results of the above parameters are standardized and recalculated according to the adopted weights (depending on the adopted pavement maintenance strategy). The values for the weights in the APCI model were determined by an expert committee through many years of research and experience. The technical condition index for artificial airfield pavements is described according to the following formula (1) [17].

$$APCI = 100 - \frac{(w_D D + w_N N + w_{W_{pp}} W_{pp} + w_R R + w_{W_{od}} W_{od})}{\sum w_i} \quad (1)$$

where:

w_i – parameter-specific weights,

$\sum w_i$ – sum of weights,

D – pavement degradation degree,

N – load-bearing capacity index,

W_{pp} – skid resistance index,

R – evenness index,

W_{od} – surface layer tensile bond strength index.

Atmospheric corrosion is the only factor that has a direct impact on pavement degradation. Studies aimed to describe the impact of atmospheric corrosion on the pavement can be delineated in the APCI pavement condition index modelling process. The presented comprehensive procedure can serve as a tool for predicting the technical condition of airfield pavements [17].

This paper focused on determining the corrosion resistance of core samples taken from concrete pavements exposed to natural atmospheric conditions occurring at individual military airfield facilities. The paper suggests a method for assessing atmospheric corrosion based on performing specific laboratory tests on both field (exposure) and reference samples stored in the laboratory.

Core samples were taken from the cement concrete airfield pavement. The samples were drilled at one of the airfield facilities. The concrete type of the samples was C35/45, and the cores are 152 mm in diameter. Samples for testing were exhibited at four selected stationary corrosion stations located at the following military airfields:

- 8 Transport Aviation Base, Kraków Balice,
- 32nd Tactical Air Base, Łask,
- 43 Marine Air Base, Gdynia,

– 31 Tactical Air Base, Poznań - Krzesiny.

The exposure period for the samples was one year (October 2022 to September 2023). Three core samples were exposed to weather conditions at each airport facility. These were positioned on a single piece of airfield plastic geogrid. The cores were placed close to the samples exposed within frames, which are also used for describing the atmospheric corrosivity. Three reference samples (stored in a water-neutral environment) were left in the laboratory.

3. Research results

As part of the analysis, tests were carried out on water absorption and the strength of the surface layer by measuring tensile bond strength and splitting tensile strength. In addition, data analysis on atmospheric conditions in the area of the corrosion stations mounted on selected airfield facilities was carried out to determine the correlation between the obtained laboratory test results and the parameters of atmospheric conditions.

3.1. Laboratory research

Water saturation tests on cylindrical specimens were carried out in accordance with NO-17-A204: 2015 *Airfield concrete pavements - Requirements and test methods for cement concrete pavements* [18], comparing the weights of specimens saturated in water and dried at $105\pm 2^{\circ}\text{C}$. A water bath with a digital thermostat, a laboratory dryer, and an electronic balance were used for the tests. The water absorption was calculated to the nearest 0.1%, according to the following formula (2):

$$n_w = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \times 100 \quad (2)$$

where:

n_w – concrete absorbability [%],

G_1 – average mass of dry specimens [g],

G_2 – average weight of water-saturated samples [g].

Testing of the bond strength of the surface layer was carried out using a ‘pull-off’ tester. The test was carried out in accordance with PN-EN 1542:2000 *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off* [19].

Splitting tensile strength tests were conducted on cores in accordance with PN-EN 12390-6:2011 *Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens* [20].

The results obtained from the reference and exposed test specimens are summarised in Table 1.

Table 1

The results of individual tests on reference samples and test samples

Test	Reference samples	Test samples			
		Gdynia	Poznań	Łask	Kraków
Water absorption [%]	4,9	4,8	5,2	5,2	4,7
Tensile bond strength [MPa]	1,9	2,1	2,4	2,8	2,1
Splitting tensile strength [MPa]	2,4	2,3	2,6	2,3	2,5

3.2. Data on meteorological conditions

The meteorological data for the analysis were obtained from the OGIMET service. It is used for storing and disclosing weather data from all over the world from various meteorological services free of charge, mainly from NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), and using open software for processing (OGIMET, 2014). The OGIMET service provides data in the processed form, i.e., daily summaries in tabular form for specific stations by WMO (World Meteorological Organisation) identification number or for a selected country based on SYNOP deposition data, representations of METAR deposition data on Google Maps, or representations of METAR deposition data, SYNOP data, and GSOD data on topographic maps and orthophotos. The service also provides data in raw form, i.e., SYNOP dispatches, METAR (Meteorological Aerodrome Report) dispatches, or TAF (Terminal Aerodrome Forecast) dispatches. In addition, the service provides images from the METEOSAT satellite, weather forecasts from the US GFS (Global Forecast System) model, and meteograms.

For the purposes of this study, daily data were acquired from SYNOP deposition data for a weather station, according to the WMO identification number, close to the site of the fixed corrosion station. The range of the analysed atmospheric parameters included:

- average temperature [°C],
- average humidity [%],

- amount of precipitation [mm],
- average wind speed [km/h].

The graphs (Figs. 1-4) show the average monthly temperature and humidity values, average monthly precipitation, and wind speed recorded at weather stations located in the area of the permanent corrosion stations.

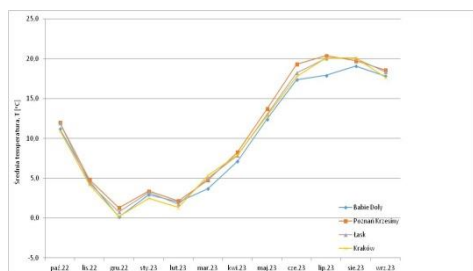


Fig. 1. Average monthly temperature values recorded at individual weather stations

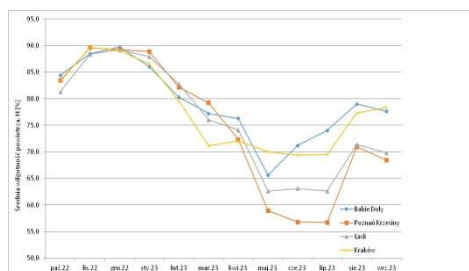


Fig. 2. Average monthly humidity values recorded at individual weather stations

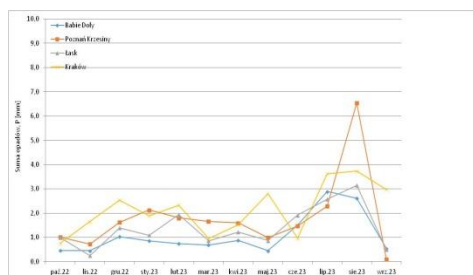


Fig. 3. Summary of monthly precipitation values recorded at individual weather stations

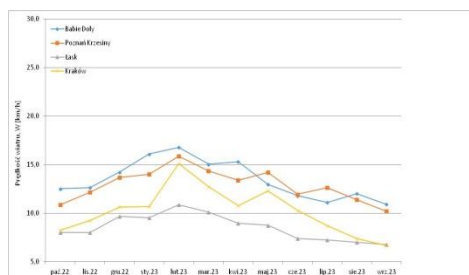


Fig. 4. Average monthly wind speed values recorded at individual weather stations

Table 2 summarises the average atmospheric parameters for the analysis period, recorded at weather stations located in the area of the stationary corrosion stations.

Table 2

Summary of the average selected atmospheric parameters in the analysed period

Corrosion station	T [°C]	H [%]	W [km/h]	P [mm]
Gdynia Babie Doły	9,7	79,2	13,4	1,1
Poznań Krzesiny	10,7	74,7	12,9	1,8
Łask	10,4	75,8	8,5	1,4
Kraków	10,1	78,0	10,2	2,1

4. Conclusions and summary

As a result of the study, no clear correlation was observed between the obtained results of the samples exposed within the stationary corrosion stations and those of the reference samples kept in a water-neutral environment (Table 1). Nevertheless, a comparison of the obtained results in terms of weight absorption with selected atmospheric parameters (Table 2) prevailing in the exposure area of the samples throughout the analysis period indicates the existence of some statistical relationship between the above data sets.

The graphs below (Figs. 5-8) show the correlations between the obtained values of water absorption by weight and the average values of the above-mentioned atmospheric parameters (average values for the analysed time period), by individual locations of sample exposure. Table 3 shows the obtained r-Pearson coefficients, r^2 and probability p, with a confidence interval of 95%.

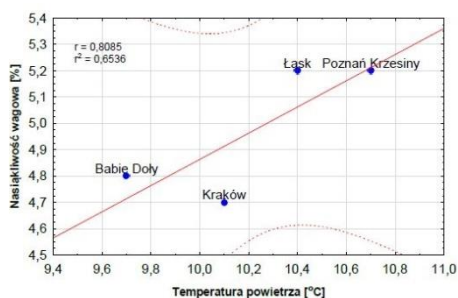


Fig. 5. Correlation diagram of the weight absorption values of the exhibited samples and the average air

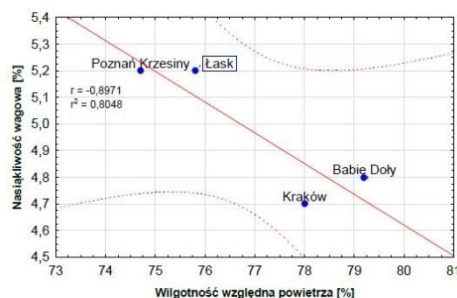


Fig. 6. Correlation diagram of the wind weight absorption values of the exhibited samples and the average relative air

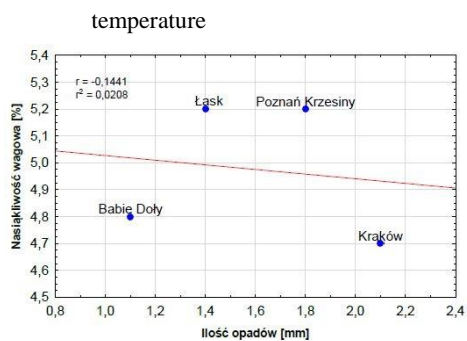


Fig. 7. Correlation diagram of the weight absorption values of the exposed samples and the average precipitation

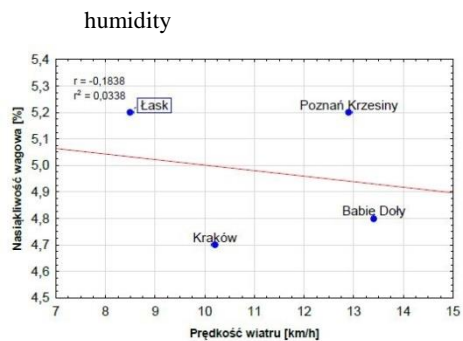


Fig. 8. Correlation diagram of the weight absorption values of the exposed samples and the average wind speed

Table 3

Statistical analysis results of the correlation between the values of the water absorption by weight of the exposed samples and the mean values of the individual atmospheric parameters at the exposure sites of the samples

Atmospheric parameter	r-Pearson coefficient	r ²	p
Air temperature	0,81	0,654	0,192
Relative air humidity	-0,90	0,805	0,103
Wind speed	-0,18	0,034	0,816
Precipitation	-0,14	0,021	0,856

Taking into account the obtained results, the highest r-Pearson coefficients were obtained in the case of the dependence of the absorption of concrete samples on the parameter of relative air humidity ($r = -0.90$) and air temperature ($r = 0.81$). For the other atmospheric parameters, i.e., wind speed and precipitation, satisfactory values of the r-Pearson coefficient were not obtained.

Placing cement concrete samples (taken from an artificial airfield pavement) in stationary corrosion stations and analyzing their selected physical parameters will allow us to determine the atmospheric corrosivity of concrete. One important element in the assessment of the airfield pavement technical condition is the determination of the atmospheric corrosivity influence on the formation of pavement deterioration, thus on its technical condition.

As a result of the study, no clear correlations were observed between the obtained results of samples exposed within the stationary corrosion stations and the results of reference samples kept in a water-neutral environment. However, a comparison of the

absorbability results with the values of temperature and relative humidity (mean values of the analysed time period) in the area of the corrosion stations indicates the existence of a statistical relationship between the above data sets. The Pearson linear correlation coefficient was $r = -0.90$ for the absorption results and the relative humidity values, and $r = 0.83$ for the absorption results and the air temperature values.

Due to no correlation between the obtained results of concrete specimens, a longer exposure period of the specimens in real conditions at airfields and/or expansion of the laboratory tests performed on the specimens should be taken into account. Nevertheless, the proposed atmospheric corrosion assessment system should be an important part of the process of developing a comprehensive analysis and assessment system of the technical condition of airfield functional elements.

5. References

1. B. Chico, D. De la Fuente, I. Díaz,, J. Simancas, M. Morcillo, „Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases”, *Materials*, vol. 10, no. 6:601, 2017. <https://doi.org/10.3390/ma10060601>.
2. D. Knotkova, K. Kreislova, SW Jr. Dean, *ISOCORRAG International Atmospheric Exposure Program: Summary of Results*, ASTM International, 2010.
3. E. Kuśmierk, E. Chrześcijańska, „Atmospheric corrosion of metals in industrial city environment”, *Data in Brief*, vol. 3, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.02.017>.
4. L. Yan, Y. Diao, Z. Lang, K. Gao, „Corrosion rate prediction and influencing factors evaluation of low-alloy steels in marine atmosphere using machine learning approach”, *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 21, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1746196>.
5. P. Koteš, M. Zahuranec, J. Prokop, A. Strauss, J. Matos, „Measurement of corrosion rates on reinforcement using the field test”, *ce/papers*, vol. 6, no. 5, 2023. <https://doi.org/10.1002/cepa.2022>
6. PN-EN ISO 8565 *Metals and alloys - Atmospheric corrosion testing - General requirements*, 2011.
7. Y. M. Panchenko, A. I. Marshakov, T. N. Igonin, V. V. Kovtanyuk, L. A. Nikolaeva, „Long-term forecast of corrosion mass losses of technically important metals in various world regions using a power function”, *Corrosion Science*, vol. 8, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.049>.

8. Y. Cai, Y. Zhao, X. Ma, K. Zhou, H. Wang, „Long-Term Prediction of Atmospheric Corrosion Loss in Various Field Environments”, *Corrosion*, vol. 74, no. 6, 2018. <https://doi.org/10.5006/2706>.
9. Y. M. Panchenko, A. I. Marshakov, „Long-term prediction of metal corrosion losses in atmosphere using a power-linear function”, *Corrosion Science*, vol. 109, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.002>.
10. L. Yan, Y. Diao, Z. Lang, K. Gao, „Corrosion rate prediction and influencing factors evaluation of low-alloy steels in marine atmosphere using machine learning approach”, *Sci Technol Adv Mater*, vol. 21, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1746196>.
11. B. Daneshian, D. Höche, O.Ø. Knudsen, „Effect of climatic parameters on marine atmospheric corrosion: correlation analysis of on-site sensors data”, *npj Mater Degrad*, vol. 7, no. 10, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00329-6>.
12. M. Wesolowski, A. Rumak, P. Iwanowski, A. Poświata, „Assessment of the Impact of Atmospheric Corrosivity on the Cement Concrete Airfield Pavement’s Operation Process”, *Sustainability*, vol. 12, no. 22, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12229560>.
13. ASTM D5340-12 *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*, ASTM International, 2018.
14. ASTM D6433-18 *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*, ASTM International, 2018.
15. M. Wesolowski, K. Blacha, P. Iwanowski, „Complex Method of Airfield Pavement Condition Evaluation Based on APCI Index”, *Applied Sciences*, vol. 12, no. 11, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12115699>.
16. M. Wesolowski, P. Iwanowski, „APCI Evaluation Method for Cement Concrete Airport Pavements in the Scope of Air Operation Safety and Air Transport Participants Life”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 5, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051663>.
17. M. Wesolowski, *Kompleksowa ocena stanu technicznego nawierzchni elementów funkcjonalnych lotnisk w aspekcie bezpieczeństwa lotów*. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2020.
18. NO-17-A204:2015 *Nawierzchnie lotniskowe – Nawierzchnie z betonu cementowego – Wymagania i metody badań*, 2015 (Polish Military Standard).
19. PN-EN 1542:2000 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Pomiar przyczepności przez odrywanie*, 2000 (Polish Standard).
20. PN-EN 12390-6:2011 *Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*, 2011 (Polish Standard).

OCENA KOROZYJNOŚCI ATMOSFERY NA PODSTAWIE EKSPOZYCJI PRÓBEK POBRANYCH Z BETONOWEJ NAWIERZCHNI LOTNISKOWEJ

1. Wprowadzenie

Powszechnie znanym faktem, potwierdzonym wynikami licznych badań jest to, że korozyjność atmosferyczna metali w jednym miejscu może być dziesiątki, a nawet setki razy większa niż w innym miejscu [1, 2]. Dlatego też, badania eksploatacyjne w warunkach naturalnych są bezwzględnie potrzebne, ze względu na brak możliwości odtworzenia w laboratorium rzeczywistych, stale zmieniających się warunków atmosferycznych występujących w miejscu ekspozycji próbek. Badania korozji atmosferycznej prowadzone są w skrajnie różniących się od siebie obszarach środowiskowych, np. zurbanizowanych [3] lub nadmorskich [4], a także przy użyciu niestandardowych, odpowiednio dobranych próbek ekspozycyjnych [5]. Dotychczas prowadzone przez autorów artykułu badania korozyjności atmosfery dotyczyły oznaczania ubytków korozyjnych próbek standardowych w postaci prostokątnych, płaskich próbek blachy materiałów zgodnie z PN-EN ISO 8565 [6]. Modelowanie i prognozowanie korozji atmosferycznej jest przedmiotem wielu badań. Panchenko Yu.M. i in. [7] dokonali prognozowania wartości ubytków korozyjnych przy pomocy funkcji potęgowej, w [8, 9] również przekształcenia liniowego (także dla prognoz długoterminowych). Autorzy w [10] przedstawili algorytmiczny model prognozowania korozyjności stalowych próbek, a także określili korelację między stopem metalu, czynnikami środowiskowymi i wielkością ubytków korozyjnych (rzeczywistych oraz szacowanych) przy pomocy współczynnika korelacji Pearsona oraz metody MIC (maximal information coefficient). Daneshian i in. [11] podjęli próbę wyznaczenia zależności pomiędzy wybranymi parametrami atmosferycznymi a korozyjnością próbek stalowych po 1 roku ekspozycji (dane charakteryzujące parametry atmosferyczne, jak i wyniki korozyjności ekspozycyjnych próbek pozyskano z jednego obiektu).

Według autorów, uwzględnienie korozyjności atmosfery w ocenie stanu technicznego nawierzchni lotniskowych jest konieczne, chociażby ze względu na niewątpliwą jej wpływ na zjawisko powstawania uszkodzeń nawierzchni. Korozyjność atmosferyczna, biorąc pod uwagę materiały, z jakich wykonano nawierzchnie lotniskowe, czy też intensywność operacji lotniczych, daje mocne argumenty do ujęcia jej w ocenie, a co najmniej szacowaniu stanu nawierzchni [12]. Ujęcie wpływu korozyjności atmosfery

w ocenie stanu technicznego elementów funkcjonalnych lotniska pozwoli uwzględnić czynniki związane z rejonem eksploatacji danego lotniska.

2. Problem badawczy i metoda badawcza

Powszechnie stosowaną metodą oceny stanu nawierzchni lotniskowych jest metoda PCI (Pavement Condition Index) [13, 14]. Polega ona na wizualnej ocenie stanu powierzchniowego nawierzchni lotniskowej i wyznaczeniu jej stopnia degradacji. Inną metodą oceny stanu technicznego nawierzchni lotniskowych jest metoda wskaźnikowa APCI (Airfield Pavement Condition Index) [15], pozwalająca na kompleksową ocenę stanu technicznego nawierzchni lotniskowej [16].

W odróżnieniu od metody PCI, która bazuje na wyniku przeglądów uszkodzeń nawierzchni, metoda APCI swoim zakresem obejmuje również zinwentaryzowane naprawy nawierzchni, a także pomiary ugięć sprężystych, właściwości przeciwpoślizgowych i równości oraz wytrzymałości warstwy przypowierzchniowej na odrywanie. Uzyskane wyniki powyższych parametrów poddaje się standaryzacji i przelicza, zgodnie z przyjętymi wagami (zależnymi od przyjętej strategii utrzymania nawierzchni). Wartości wag występujących w modelu APCI zostały wyznaczone przez gremium eksperckie na podstawie wieloletnich badań i doświadczeń. Wskaźnik stanu technicznego sztucznych nawierzchni lotniskowych jest opisany według wzoru (1) [17].

$$APCI = 100 - \frac{(w_D D + w_N N + w_{Wpp} W_{pp} + w_R R + w_{Wod} W_{od})}{\sum w_i} \quad (1)$$

gdzie:

w_i – wagi charakterystyczne dla określonego parametru,

$\sum w_i$ – suma wag,

D – stopień degradacji nawierzchni,

N – wskaźnik nośności,

W_{pp} – wskaźnik właściwości przeciwpoślizgowych,

R – wskaźnik równości,

W_{od} – wskaźnik wytrzymałości warstwy przypowierzchniowej na odrywanie.

Jednym z czynników który ma bezpośredni wpływ na degradację nawierzchni jest korozja atmosferyczna. Badania mające na celu określenie oddziaływania korozji atmosferycznej na nawierzchnię mogą zostać ujęte w procesie modelowania wskaźnika stanu nawierzchni APCI. Przedstawiona kompleksowa procedura może posłużyć jako narzędzie do prognozowania stanu technicznego nawierzchni lotniskowych [17].

Przedstawione w artykule badania polegały na określeniu odporności na korozję próbek w postaci odwiertów pobranych z nawierzchni betonowej, eksponowanych w naturalnych warunkach atmosferycznych występujących na terenie poszczególnych wojskowych obiektów lotniskowych. W pracy zaproponowano metodę oceny korozji atmosferycznej opartą na wykonaniu określonych badań laboratoryjnych na próbkach terenowych (ekspozycyjnych), jak i na próbkach świadkach przechowywanych w laboratorium.

Próbki do badań w postaci odwiertów zostały pobrane z nawierzchni lotniskowej wykonanej w technologii betonu cementowego. Próbki zostały odwiercone na jednym z obiektów lotniskowych. Klasa betonu pobranych próbek to C35/45. Odwierty mają średnicę 152 mm. Próbki do badań wystawione były w czterech wytypowanych stałych stacjach korozyjnych znajdujących się na poniższych lotniskach wojskowych:

- 8 Baza Lotnictwa Transportowego, Kraków Balice,
- 32 Baza lotnictwa Taktycznego, Łask,
- 43 Baza Lotnictwa Morskiego, Gdynia,
- 31 Baza Lotnictwa Taktycznego, Poznań - Krzesiny.

Okres ekspozycji próbek wynosił rok (od października 2022 r. do września 2023 r.). Na każdym z obiektów lotniskowych wystawiono na działanie warunków atmosferycznych trzy próbki w postaci odwiertów. Zostały one ustawione na pojedynczym elemencie kraty lotniskowej wykonanej z tworzywa sztucznego. Odwierty ułożono w pobliżu wystawionych płytek wzorcowych, które również służą do określenia korozyjności atmosfery. W laboratorium pozostawiono trzy próbki świadki (próbki przechowywane w środowisku neutralnym w wodzie).

3. Wyniki badań

W ramach analizy przeprowadzono badania nasiąkliwości w wodzie, wytrzymałości warstwy powierzchniowej przez pomiar wytrzymałości na odrywanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Ponadto, przeprowadzono analizę danych o warunkach atmosferycznych panujących w rejonie stacji korozyjnych posadowionych na wytypowanych obiektach lotniskowych w celu określenia korelacji pomiędzy uzyskanymi wynikami badań laboratoryjnych a parametrami charakteryzującymi warunki atmosferyczne.

3.1. Badania laboratoryjne

Badania nasiąkliwości próbek cylindrycznych w wodzie wykonano zgodnie z normą NO-17-A204: 2015 *Nawierzchnie lotniskowe - Nawierzchnie z betonu cementowego - Wymagania i metody badań* [18], porównując masy próbek nasyconych wodą i wysuszonych w temperaturze $105 \pm 2^\circ\text{C}$. Do badań wykorzystano wannę wodną z termostatem cyfrowym, suszarkę laboratoryjną oraz wagę elektroniczną. Nasiąkliwość obliczono z dokładnością do 0,1%, wg następującego wzoru (2):

$$n_w = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \times 100 \quad (2)$$

gdzie:

n_w – nasiąkliwość betonu [%],

G_1 – średnia masa próbek suchych [g],

G_2 – średnia masa próbek nasyconych wodą [g].

Badanie wytrzymałości warstwy przypowierzchniowej na odrywanie przeprowadzono za pomocą aparatu „pull-off”. Badanie zostało wykonane zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1542:2000 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Pomiar przyczepności przez odrywanie* [19].

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono na odwiertach zgodnie z normą PN-EN 12390-6:2011 *Badania betonu - Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań* [20].

Uzyskane wyniki badań próbek świadków oraz próbek eksponowanych w warunkach rzeczywistych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wyniki poszczególnych badań próbek świadków oraz próbek eksponowanych w warunkach rzeczywistych

Badanie	Próbki świadki	Próbki eksponowane			
		Gdynia	Poznań	Łask	Kraków
Nasiąkliwość w wodzie [%]	4,9	4,8	5,2	5,2	4,7
Wytrzymałość na odrywanie [MPa]	1,9	2,1	2,4	2,8	2,1
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	2,4	2,3	2,6	2,3	2,5

3.2. Dane charakteryzujące warunki meteorologiczne

Dane meteorologiczne do analizy pozyskano z serwisu OGIMET, który przechowuje i udostępnia bezpłatnie dane pogodowe z całego świata, pochodzące z różnych serwisów meteorologicznych, głównie z NOAA (ang. National Oceanic and Atmospheric Administration), oraz używającym do ich przetwarzania oprogramowania typu Open Software (OGIMET, 2014). Serwis OGIMET udostępnia dane w postaci przetworzonej, tj. dzienne podsumowania w postaci tabelarycznej dla konkretnych stacji według identyfikatora WMO (ang. World Meteorological Organization) lub dla wybranego kraju na podstawie danych z depeż SYNOP, reprezentacje danych z depeż METAR na mapach Google czy reprezentacje danych z depeż METAR, SYNOP oraz danych GSOD na mapach topograficznych i ortofotomapach. Serwis udostępnia również dane w postaci surowej, tj. depeże SYNOP, depeże METAR (ang. Meteorological Aerodrome Report), czy też depeże TAF (Terminal Aerodrome Forecast). Ponadto serwis udostępnia zdjęcia z satelity METEOSAT, prognozę pogody z amerykańskiego modelu GFS (ang. Global Forecast System) oraz meteogramy.

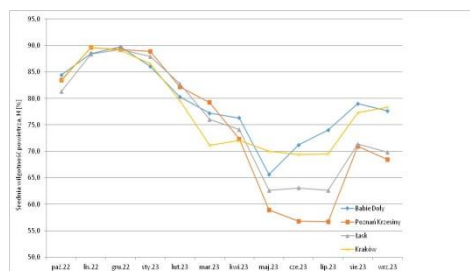
Do celów niniejszej pracy, na podstawie danych z depeż SYNOP, pozyskano dzienne dane dla stacji pogodowej, według identyfikatora WMO, będącej w pobliżu obiektu, na którym znajduje się stała stacja korozyjna. Zakres analizowanych parametrów atmosferycznych obejmował:

- średnią temperaturę [°C],
- średnią wilgotność powietrza [%],
- ilość opadów [mm],
- średnią prędkość wiatru [km/h].

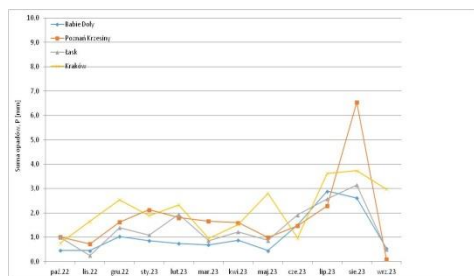
Na wykresach (rys. 1-4) przedstawiono średnie miesięczne wartości temperatury i wilgotności powietrza, średnie miesięczne ilości opadów oraz prędkości wiatru zarejestrowane na stacjach pogodowych znajdujących się w rejonie stałych stacji korozyjnych.



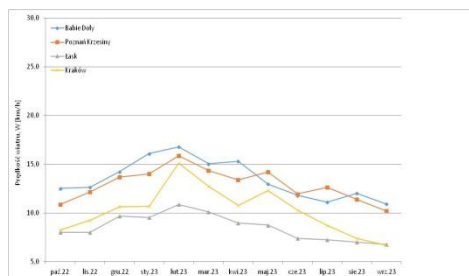
Rys. 1. Średnie miesięczne wartości temperatury zarejestrowane na poszczególnych stacjach pogodowych



Rys. 2. Średnie miesięczne wartości wilgotności powietrza zarejestrowane na poszczególnych stacjach pogodowych



Rys. 3. Sumaryczne miesięczne wartości opadów zarejestrowane na poszczególnych stacjach pogodowych



Rys. 4. Średnie miesięczne wartości prędkości wiatru zarejestrowane na poszczególnych stacjach pogodowych

W tabeli 2 zestawiono średnie wartości parametrów atmosferycznych z okresu objętego analizą, zarejestrowanych na stacjach pogodowych znajdujących się w rejonie stałych stacji korozyjnych.

Tabela 2

Zestawienie średnich wartości wybranych parametrów atmosferycznych w analizowanym okresie

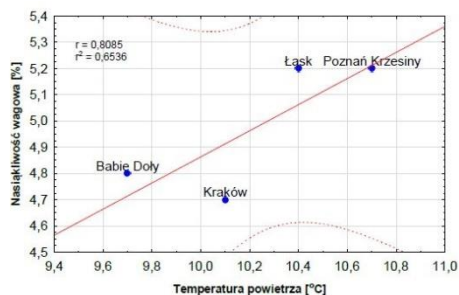
Stacja korozyjna	T [°C]	H [%]	W [km/h]	P [mm]
Gdynia Babie Doły	9,7	79,2	13,4	1,1
Poznań Krzesiny	10,7	74,7	12,9	1,8
Łask	10,4	75,8	8,5	1,4
Kraków	10,1	78,0	10,2	2,1

4. Wnioski i podsumowanie

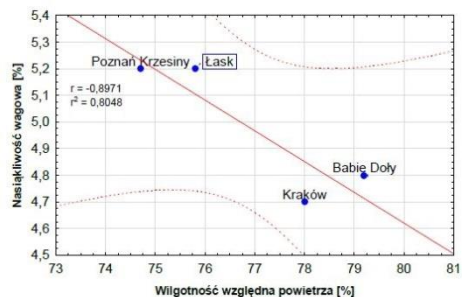
W wyniku przeprowadzonych badań nie zaobserwowano jednoznacznych zależności pomiędzy uzyskanymi wynikami próbek ekspozycyjnych w obrębie stałych stacji korozyjnych a wynikami próbek świadków przetrzymywanych w środowisku neutralnym w wodzie (tabela 1). Niemniej jednak, porównanie otrzymanych wyników w zakresie nasiąkliwości wagowej z wybranymi parametrami atmosferycznymi (tabela 2) panującymi w rejonie ekspozycji próbek przez cały okres objęty analizą wskazuje na istnienie pewnej zależności statystycznej pomiędzy powyższymi zbiorami danych.

Na wykresach poniżej (rys. 5–8) przedstawiono korelacje między otrzymanymi wartościami nasiąkliwości wagowej a średnimi wartościami wyżej wymienionych parametrów atmosferycznych (wartości średnie dla analizowanego okresu czasu),

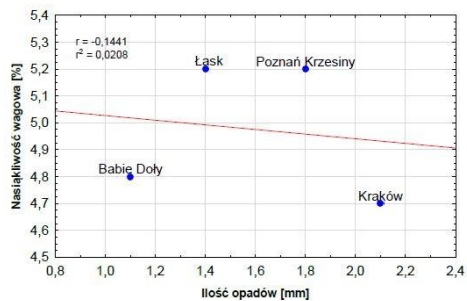
w podziale na poszczególne lokalizacje ekspozycji próbek. W tabeli 3 przedstawiono uzyskane współczynniki r-Pearsona, r^2 oraz prawdopodobieństwo p, przy przedziale ufności na poziomie 95%.



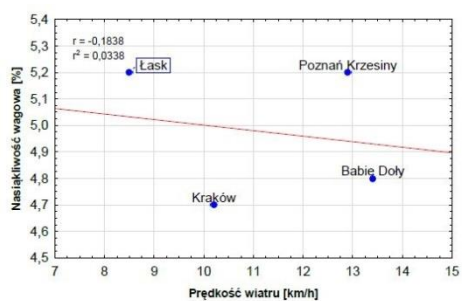
Rys. 5. Wykres korelacji wartości nasiąkliwości wagowej eksponowanych próbek i średnimi wartościami temperatury powietrza



Rys. 6. Wykres korelacji wartości nasiąkliwości wagowej eksponowanych próbek i średnimi wartościami wilgotności względnej powietrza



Rys. 7. Wykres korelacji wartości nasiąkliwości wagowej eksponowanych próbek i średnimi ilościami opadów



Rys. 8. Wykres korelacji wartości nasiąkliwości wagowej eksponowanych próbek i średnimi wartościami prędkości wiatru

Tabela 3

Wyniki analizy statystycznej korelacji wartości nasiąkliwości wagowej próbek eksponowanych i średnich wartości poszczególnych parametrów atmosferycznych występujących w miejscach ekspozycji próbek

Parametr atmosferyczny	współczynnik r-Pearsona	r^2	p
Temperatura powietrza	0,81	0,654	0,192
Wilgotność względna powietrza	-0,90	0,805	0,103
Prędkość wiatru	-0,18	0,034	0,816
Ilość opadów	-0,14	0,021	0,856

Biorąc pod uwagę otrzymane wyniki, najwyższe współczynniki r-Pearsona uzyskano w przypadku zależności nasiąkliwości próbek betonowych od parametru wilgotności względnej powietrza ($r = -0,90$) oraz temperatury powietrza ($r = 0,81$). W przypadku pozostałych parametrów atmosferycznych, tj. prędkości wiatru oraz ilości opadów nie uzyskano satysfakcjonujących wartości wskaźnika r-Pearsona.

Umieszczenie próbek z betonu cementowego (pobrane z sztucznej nawierzchni lotniskowej) w stałych stacjach korozyjnych i analiza ich wybranych parametrów fizycznych pozwoli na określenie wpływu korozyjności atmosfery na beton. Jednym z ważnych elementów oceny stanu technicznego nawierzchni lotniskowych jest określenie wpływu korozyjności atmosfery na powstawanie uszkodzeń nawierzchni, a tym samym na jej stan techniczny.

W wyniku przeprowadzonych badań nie zaobserwowano jednoznacznych zależności pomiędzy uzyskanymi wynikami próbek eksponowanych w obrębie stałych stacji korozyjnych, a wynikami próbek świadków przetrzymywanych w środowisku neutralnym w wodzie. Jednakże, porównanie wyników w zakresie nasiąkliwości z wartościami temperatury i wilgotności względnej powietrza (wartości średnie analizowanego okresu czasu) w rejonie stacji korozyjnych wskazuje na istnienie zależności statystycznej pomiędzy powyższymi zbiorami danych. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona wyniósł $r = -0,90$ w przypadku wyników nasiąkliwości oraz wartości wilgotności względnej powietrza, a w przypadku wyników nasiąkliwości oraz wartości temperatury powietrza wyniósł $r = 0,83$.

Ze względu na brak korelacji pomiędzy uzyskanymi wynikami próbek betonowych, należy rozważyć dłuższy okres ekspozycji próbek w warunkach rzeczywistych na lotniskach lub/i rozszerzenie zakresu badań laboratoryjnych wykonywanych na próbkach. Niemniej jednak, proponowany system oceny korozji atmosferycznej powinien stanowić ważny element procesu opracowywania kompleksowego systemu analizy i oceny stanu technicznego nawierzchni lotniskowych elementów funkcjonalnych lotnisk.

5. Literatura

1. B. Chico, D. De la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, M. Morcillo, „Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases”, *Materials*, vol. 10, no. 6:601, 2017. <https://doi.org/10.3390/ma10060601>.
2. D. Knotkova, K. Kreislova, SW Jr. Dean, ISOCORRAG International Atmospheric Exposure Program: Summary of Results, ASTM International, 2010.
3. E. Kuśmierk, E. Chrześcijańska, „Atmospheric corrosion of metals in industrial city environment”, *Data in Brief*, vol. 3, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.02.017>.
4. L. Yan, Y. Diao, Z. Lang, K. Gao, „Corrosion rate prediction and influencing factors evaluation of low-alloy steels in marine atmosphere using machine learning approach”, *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 21, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1746196>.
5. P. Koteš, M. Zahuranec, J. Prokop, A. Strauss, J. Matos, „Measurement of corrosion rates on reinforcement using the field test”, *ce/papers*, vol. 6, no. 5, 2023. <https://doi.org/10.1002/cepa.2022>
6. PN-EN ISO 8565 Metals and alloys - Atmospheric corrosion testing - General requirements, 2011.
7. Y. M. Panchenko, A. I. Marshakov, T. N. Igonin, V. V. Kovtanyuk, L. A. Nikolaeva, „Long-term forecast of corrosion mass losses of technically important metals in various world regions using a power function”, *Corrosion Science*, vol. 8, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.049>.
8. Y. Cai, Y. Zhao, X. Ma, K. Zhou, H. Wang, „Long-Term Prediction of Atmospheric Corrosion Loss in Various Field Environments”, *Corrosion*, vol. 74, no. 6, 2018. <https://doi.org/10.5006/2706>.
9. Y. M. Panchenko, A. I. Marshakov, „Long-term prediction of metal corrosion losses in atmosphere using a power-linear function”, *Corrosion Science*, vol. 109, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.002>.
10. L. Yan, Y. Diao, Z. Lang, K. Gao, „Corrosion rate prediction and influencing factors evaluation of low-alloy steels in marine atmosphere using machine learning approach”, *Sci Technol Adv Mater*, vol. 21, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1746196>.
11. B. Daneshian, D. Höche, O.Ø. Knudsen, „Effect of climatic parameters on marine atmospheric corrosion: correlation analysis of on-site sensors data”, *npj Mater Degrad*, vol. 7, no. 10, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00329-6>.

12. M. Wesołowski, A. Rumak, P. Iwanowski, A. Poświata, „Assessment of the Impact of Atmospheric Corrosivity on the Cement Concrete Airfield Pavement’s Operation Process”, *Sustainability*, vol. 12, no. 22, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12229560>.
13. ASTM D5340-12 Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, 2018.
14. ASTM D6433-18 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, 2018.
15. M. Wesołowski, K. Blacha, P. Iwanowski, „Complex Method of Airfield Pavement Condition Evaluation Based on APCI Index”, *Applied Sciences*, vol. 12, no. 11, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12115699>.
16. M. Wesołowski, P. Iwanowski, „APCI Evaluation Method for Cement Concrete Airport Pavements in the Scope of Air Operation Safety and Air Transport Participants Life”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 5, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051663>.
17. M. Wesołowski, *Kompleksowa ocena stanu technicznego nawierzchni elementów funkcjonalnych lotnisk w aspekcie bezpieczeństwa lotów*. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2020.
18. NO-17-A204:2015 *Nawierzchnie lotniskowe – Nawierzchnie z betonu cementowego – Wymagania i metody badań*, 2015.
19. PN-EN 1542:2000 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Pomiar przyczepności przez odrywanie*, 2000.
20. PN-EN 12390-6:2011 *Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*, 2011.