

Małgorzata LINEK¹, Piotr NITA², Wojciech ŻEBROWSKI¹, Paweł WOLKA¹

¹ Kielce University of Technology (Politechnika Świętokrzyska)

² Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

INFLUENCE OF OPERATING MEDIA ON THE PARAMETERS OF CEMENT CONCRETE INTENDED FOR AIRFIELD PAVEMENTS

Wpływ mediów eksploatacyjnych na parametry betonu cementowego przeznaczonego na nawierzchnie lotniskowe

Abstract: The article presents the influence of the suggested operating media on the modification of parameters of cement concrete intended for airfield pavements. Cement concrete contains cement CEM I 42,5, granite grit, fine washed aggregate, water and air entraining as well as plasticizing additive. Analyses included the assessment of changes in mechanical and physical parameters (weight absorbability and water capillary action) of hardened concrete. The observed changes were associated with the internal structure of concrete composite. Based on the obtained results, different influence of the applied operating media on mechanical parameters of hardened concrete was determined.

Keywords: concrete pavement, operating media, cement concrete

Streszczenie: W artykule omówiono wpływ zaproponowanych mediów eksploatacyjnych na zmianę parametrów betonu cementowego przeznaczonego na nawierzchnie lotniskowe. W składzie betonu cementowego uwzględniono cement CEM I 42,5, gryś granitowy, kruszywo drobne płukane, wodę oraz domieszkę napowietrzającą i plastyfikującą. Analizy obejmowały ocenę zmian parametrów mechanicznych i fizycznych (nasiąkliwość masowa i podciąganie kapilarne) stwardniałego betonu. Zaobserwowane zmiany powiązano z budową struktury wewnętrznej kompozytu betonowego. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono zróżnicowany wpływ zastosowanych mediów eksploatacyjnych na parametry mechaniczne stwardniałego betonu.

Słowa kluczowe: nawierzchnia betonowa, media eksploatacyjne, beton cementowy

1. Introduction

Airfield pavements are exposed to the detrimental influence of external factors during the whole period of their operation. The impact is diverse and strictly connected with environmental conditions, operation time, maintenance treatments conducted on airfields to guarantee the safety of the ground traffic. The load of airfield pavement depends on many interdependent factors, among which the most significant are loads generated by aircraft. They comprise static, dynamic and thermal loads. The static load is understood as a maximum vertical impact of the wheels of the main landing gear strut of computational aircraft [22]. External dynamic loads are caused by aeroplanes operating on airfield pavements. The character of the dynamic load should be identified with a particular phase of aircraft movement [23]. The characteristic feature of pavements' loads also includes the occurrence of variable loads resulting from aerodynamic principles of aircraft movement, depending on the speed of aircraft movement on the ground. A particular type of detrimental impact of aeroplanes on airfield pavements also includes periodic forced thermal loads. They occur as a result of the emission of hot exhaust gases from nozzles of taking-off aeroplanes on the near-surface layer of concrete [18]. Currently, it is essential to determine the influence of operating media in the course of the operational use of aircraft and their impact on cement concrete of the runway area. The general division of operating media used for research purposes was exhibited in fig. 1.

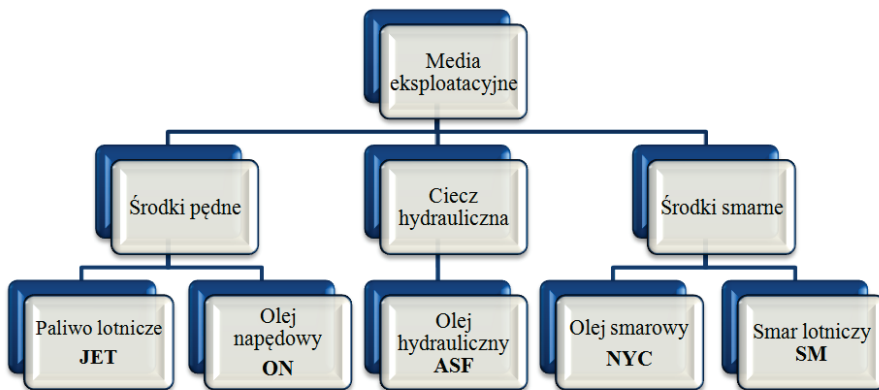


Fig. 1. Classification of the applied propellants, hydraulic media and lubricants (operating media)

2. Significance of the impact of operating media on airfield pavements - literature review

The problem of the negative impact of operating media on airfield pavements has yet not been discussed in the national technical literature. Some available information covers only the selected general aspects and does not apply to the requirements of airfield pavements.

The author of the article [1] proved that the performed cement blocks immersed in the creosote oil demonstrate after 2 months a reduced compression strength by approx. 35% and bending strength by approx. 15% in relation to the concrete samples stored in water. The author states that the reason for the decrease in strength can be the intermolecular smoothness of the internal components of cement.

Other research studies [2, 3] concerned the penetration of concrete by different mixtures of the boiled linseed oil with white spirit. These solutions were used as protective coatings for concrete bridge surfaces from the chloride ingress. The studies were conducted for concretes with variable water:cement ratio and for concretes with different percentage of linseed oil to white spirit (100/0, 90/10, 75/25, 50/50, 30/70). It was demonstrated that the mixture containing 30% of linseed oil with 70% content of solvent (7.6 cm) penetrates deepest, which is explained by the authors by the lowest viscosity of the mixture. It was also observed that the higher the w/c ratio is, the higher is the penetration depth of the solution and absorbability. The presented results [2] of compressive strength tests of concrete impregnated with linseed oil indicate a rapid change of the tested parameter. After 7 days of concrete impregnation, there was a decrease in its strength by above 25%. However, after 120 days, there was an increase in strength by 6.5%. A decrease in strength at the initial period results from the chemical attack of acids on the structure of hydrated concrete. An increase in strength in the longer period of time is due to the solidification and polymerization of linseed oil in the air voids of concrete.

The permeability test of oil through concrete with different water/cement ratio was also conducted by the author of article [28]. The tests conducted for concrete made of quartzite aggregate proved that the higher is the absorbability of concrete with oil, the bigger is the reduction of its strength. The author presented the results of the decrease in compressive strength in the range from 2% to 11% after 24 weeks of storing the concrete samples in oil. The reference level was the samples of controlled concrete stored in air-dried state. The author demonstrated that the permeability of cement matrix depends on its porosity, which is controlled mainly by water/cement ratio, cement hydration and fineness level. The permeability of concrete is the function of porosity of cement matrix.

Experimental tests concerning the chemical destruction of airfield hardstands under the impact of periodic exposure to temperature emitted from the nozzles of turbojet engines in the presence of engine oil and hydraulic fluid were exhibited in [13, 19, 20, 21, 27]. The authors discovered the damages of the real concrete surface in the form of delaminations on the small depth and spallings of the near-surface layer of concrete. Concrete destruction occurred at impact zones of exhaust gases from exhaust nozzles of F/A-18 and B-1 aircraft

on the areas of effluents of operating media. The authors [13, 19, 20, 21, 27] mention the absorbers of calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$, hydrated silicates and aluminates as the chemical processes associated with the occurrence of operating media on the runway. They observed that a porous cement matrix was formed with loose aggregate grains. The study included engine oil and hydraulic oil composed of 95% and 30% of esters respectively. Due to the conversion of calcium chloride, there is a decrease in pH value of concrete. Since pH of concrete is higher than 12, and surface temperature oscillated around approx. 175°C, reactions occurred very fast in the top concrete layer.

Polish experiences from the impact of substances originating from the processing of petroleum were illustrated in publications [4-7] and [14, 15]. The observed problem was found in structural concrete of industrial buildings, where mineral oils were stored. It also applied to foundations of transformer stations. Adhesion zone between cement matrix and aggregate, the so-called contact area was mentioned in publications [14,15] as the central accumulation spot of petroleum substances. Studies presented in [9, 14, 15] demonstrated that concrete with strength class above C25/30, increases the mass up to 1.5% due to being saturated with oil, thus causing a slight decrease in strength. For concrete with absorbability of 3.7% of mineral oil, this decrease amounts to 40%. The authors underlined that particle size distribution of aggregate, except for its type, determines the decrease in concrete strength. For the same concrete class, reduction in strength is higher for concrete with the aggregate of particle size distribution to 20 mm, than of particle size distribution to 10 mm.

Publication [25] discussed the studies of the influence of both mineral machine oil L-AN 22 and cooling emulsion Emulgol ES12 (based on mineral oil) on concrete for the period of 4 years. The results confirmed that young concrete saturated with mineral oil leads to the decrease of strength parameters by approx. 15÷25%, and in the case of the cooling-lubricant emulsion by 20÷30%. The reasons include gradual penetration of oil into the pores of concrete while pushing water out of them. Moreover, oil, which is inactive concerning the creation of crystal lattices in the cement hydration process, limits the average increase in its strength over time. By penetrating in the concrete structure, it weakens bonds and increases the intermolecular smoothness between aggregate and binder. However, by studying the coefficient of elasticity under influence of media, it is necessary to fill the pores with fluid. If the pores in the concrete are filled with fluid, then the coefficient of elasticity is higher until squeezing the liquid out of pores takes place.

The studies [4, 5, 6] of the author aimed at determining the influence of mineral oils on mortar and cement concrete indicate the lack of significant influence of the viscosity of tested substances on deterioration degree of concrete. The final effect of the impact of three different oils: TU-20, M-40 and H-70 with kinematic viscosity in temperature 20°C, 81.0 mm²/s, 211.4 mm²/s and 383.0 mm²/s respectively, is fundamentally different. After 6 years in the case of compressive strength, the author observed a decrease in strength from 10% in the case of oil M-40 to 55% for oil H-70, but oil M-40 did not result in a decrease in strength below the initial value.

Similar studies on the effect of the gear oil on compressive strength of hardened concrete were also exhibited in [8]. The obtained results show that the presence of oil caused

a decrease in the compressive strength of concrete from 12% to 17%. It was also concluded that the higher is the absorbability of concrete with oil, the more significant is the decrease in its strength.

Deterioration mechanism of concrete structure by petroleum products is a complex process. The chemical factors include the presence of anaerobic and sulfur bacteria in the appropriate environment.

The action of acids on concrete is related to reacting with calcium hydroxide and aluminium compounds. Acetic acid reacts with calcium hydroxide or calcium oxide, which results in the formation of calcium acetate. It should also be mentioned that other organic acids react with $\text{Ca}(\text{OH})_2$, which leads to the formation of soft soluble calcium soaps. The ramification of this can be a decomposition of calcium silicates, which leads to softening or cracking of concrete structure [4, 5].

Due to the interaction of sulfuric acid and sulfur compounds with soluble calcium, the concrete structure is porous. In the presence of sulfates, swelling salts are accumulated due to the formation of Candlot salts ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) with cracking and concrete deterioration as a result.

Among physico-chemical aspects leading to the changes in the concrete structure is mentioned the surface energy by the adsorption of the reacting substance, which may be the reason for the 'unwedging effect'.

The effect of the occurrence of this phenomenon is plasticization of surface. The possible existence of the surface crack enables the molecules to penetrate the material structure. As a consequence, it leads to weakening of bonds and further expansion of crack [6].

The mechanism of physical destruction of concrete structure occurs when high temperature acts on concrete contaminated by oil, resulting in the significant expansion of oil in concrete pores. In effect, this leads to the increase in internal pressure, which contributes to the occurrence of microcracks in concrete structure.

Mechanical properties of concrete composite depend on the properties of grout and aggregate and on the contact area between aggregate and grout. Contact area differs significantly from the neighbouring grout and aggregate in terms of morphology and density. Irrespective of the aggregate type, this area is characterized by density of approx. $50 \mu\text{m}$. It is an area with the greatest porosity and permeability in the whole grout. Therefore, it determines not only the mechanical parameters of concrete composite but also its durability. However, it should also be mentioned that the calcium hydroxide observed in this area is the weakest product and least resistant to chemical aggression [16, 17].

In [5,6], it was demonstrated that contact areas of concrete with different aggregate/cement ratio are fundamental voids, which penetrate petroleum products damaging the structure of concrete composite.

3. Requirements for airfield pavement concrete

In establishing the composition of airfield pavement concrete, environmental conditions defined by standards [29, 30] were taken into account. XC4 carbonation-induced corrosion of chlorides not originating from the seawater XD3, aggression caused the cyclic freezing and de-freezing XF4 and aggression caused by abrasion XM1 was also considered.

Table 1 shows standard requirements of limit values of the composition of concrete mixtures intended for airfield pavements and includes the impact of environment aggression.

Table 1

Project requirements depending on the exposure class

Exposure class	Limits			
	Maximum w/c ratio	Minimum cement content [kg]	Minimum concrete class	Air content in concrete mixture
XC4	0.50	300	C30/37	-
XD3	0.45	320	C35/45	-
XF4	0.45	340	C30/37	4.0%
XM1	0.55	300	C30/37	-

The concrete mixture includes water and its quantity depends on the assumed w/c ratio (maximum w/c ratio is 0.4 compliant to [29]). The pH value of water shall be ≥ 4 , content of $H_2S \leq 20 \text{ mg/dm}^3$, content of sulfates $\leq 600 \text{ mg/dm}^3$, and content of sugars $\leq 500 \text{ mg/dm}^3$. The most important component of concrete mixture is the aggregate. The content of aggregate in the mixture is usually 70-75%. The type of the aggregate used has a fundamental significance in determining the parameters of hardened concrete. For research purposes, granite grit 2/8 mm and 8/16 mm was adopted. Particle size distribution curves of mixtures shall be in between limit curves (bottom and top) determining the scope of the good particle size distribution according to [29]. To estimate the usability of the devised concretes to build in the structure of airfield pavements, according to [29], it is required to determine its physical and mechanical features in the adopted curing period (it reaches full strength 28 days after placement).

4. Purpose and scope of experimental tests

The objective of laboratory tests was to establish the impact of the applied operating media on the change in parameters of hardened concrete in the context of its durability. The

devised mineral mixtures meet requirements included in standard [29]. The aggregate composition comprises of granite grit (Gg) with particle size distribution 2/8 mm and 8/16 mm. The contribution of particular fractions in the aggregate composition of the mixture amounted respectively to 35% (860kg/m³) and 24% (600kg/m³). In the mixtures, fine aggregate (Kd) meeting the requirements [29] was also applied. The quantity of fine aggregate in the mixture was 540 kg/m³. 136 kg/m³ of water, 1,7 kg/m³ of air entraining admixture and 3,7 kg/m³ of superplasticizer was applied. The research comprised concrete class C30/37, appropriate for airfield pavements. Research included five series - one for each of the selected media. In the framework of each session, was analysed controlled concrete stored in normal conditions and concrete exposed to one of these media: ASF, NYC, JET, ON, SM (designations were adopted according to fig. 1). The prepared concretes were conditioned in water for 28 days in a temperature of 20 ± 2°C and then they were left in air-dried state for 14 days and intended for maintenance in the selected media. The series of samples intended for the determination of the impact of operating media was placed in particular operating media (ASF, NYC, JET, ON) to the height of 2 cm. In the case of aviation lubricant SM, 2 mm layer was put on the top layer of samples. To define the influence of the operating media on the parameters of hardened concrete, the following was determined:

- compressive strength as specified by requirement of standard [31] after 28 days of maintenance and after 168 days of the exposure to selected media;
- bending strength according to [32] after 28 days of maintenance;
- splitting tensile strength according to [33] after 28 days of maintenance;
- capillary action and infiltration. The test was done on 6 cubical samples with the edge of 15 cm, which were stored for 14 days in air-dried state in a temperature of 20 ± 2°C before the commencement of tests.

To estimate the impact of the applied media on changes in the internal structure, concretes were subjected to observations in the Scanning Electron Microscope (SEM). Preparation of samples and interpretation of the obtained results were in line with the one described in references [12, 18, 24]. Fresh fractures were prepared from controlled concretes and from concretes exposed to media. The surface of preparations subjected to observations in SEM was every time more than 1 cm² and the range of the applied magnifications was from 200x to 100 000x.

5. Results of laboratory tests

Based on the obtained test results (fig. 2a and 2b) it was established that the influence of the analysed media on average compression strength of concrete depends on their exposure time. After 28 days of maintenance, this change is not significant. A decrease in the investigated parameter maximally by 2,4% was recorded in the case of concrete stored in lubricating oil NYC and by 1,2% for hydraulic oil ASF and diesel oil ON. The extension

of exposure time of media on concrete to 168 days enhances a negative impact on investigated parameter. In the case of ON, JET and ASF, a decrease of the average compression strength by above 3% was established and for lubricating oil NYC, a decrease was higher and it amounted to 7%. Based on the accumulated results, it was also stated that aviation lubricant SM does not affect the investigated parameter.

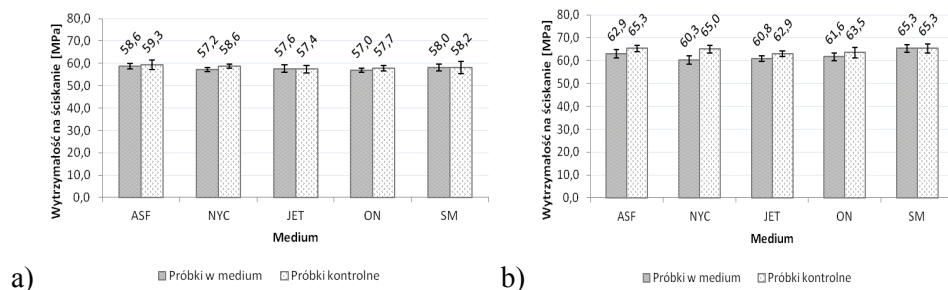


Fig. 2. The average compression strength of concrete subjected to the exposure to operating media for 28 (a) and 168 (b) days

Based on the obtained test results (fig. 3a and 3b), the influence of the analysed media on average splitting tensile strength and average bending strength was not found. The recorded parameters remain at a comparable level.

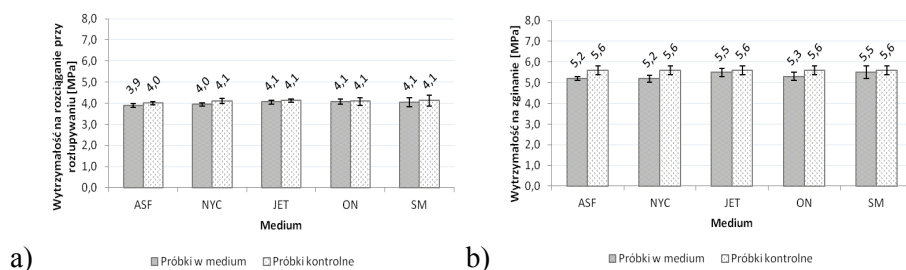


Fig. 3. The average splitting tensile strength (a) and bending strength (b) of concrete subjected to the exposure to operating media for 28 days

Based on the obtained test results (fig. 4) it was established that the influence of the analysed media on capillary length is significant. In the case of ASF and NYC, the penetration depth increased twice and three times respectively. A clear negative impact on the analysed feature also has JET and ON, in the case of which the limitation of penetration depth was the dimension of the analysed sample. A clear positive impact was observed in the case of aviation lubricant SM. Using this medium contributed to the decrease in infiltration into the concrete.

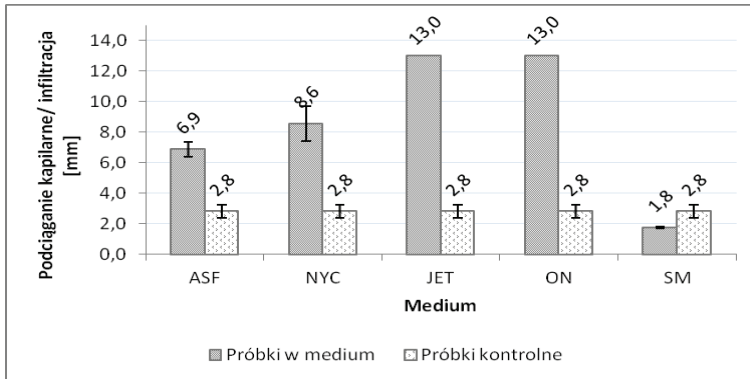


Fig. 4. The average value of capillary action of operating media and infiltration of aircraft lubricant in the period of 28 days

Based on observations in SEM, it was established that there is an impact on the analysed media on the changes in the internal structure of concrete composites. In the case of cement matrix, hydration products were subject to change in the area exposed to operating media (fig. 5). There were observed increased openings of micro-cracks in relation to the controlled concrete and change in the porosity character, manifesting itself by a different cristallization (fig. 6).

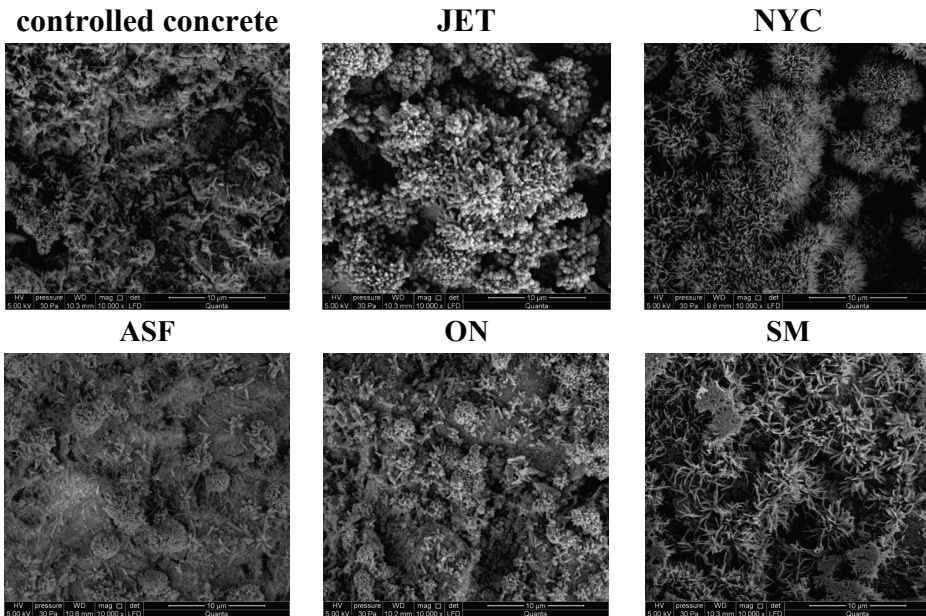


Fig. 5. Formation of a cement matrix in controlled concrete and concrete exposed to JET, NYC, ASF, ON and SM

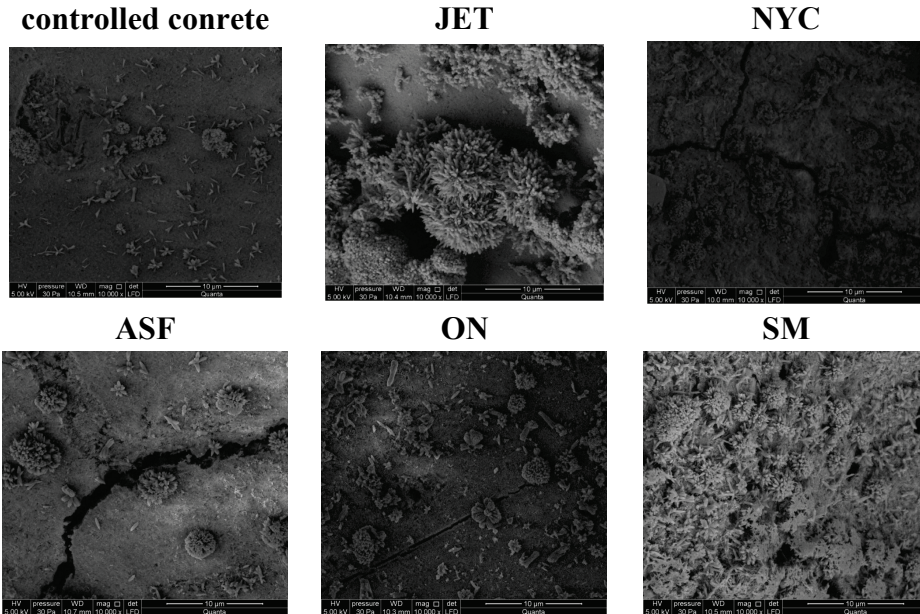


Fig. 6. Formation of an air void in controlled concrete and concrete exposed to JET, NYC, ASF, ON and SM

6. Conclusions

Building upon the obtained test results, it was established that:

- the analysed operating media (ASF, NYC, JET, ON) affect the change in parameters of hardened concrete, especially in the extended exposure time. There was a decrease of mechanical and physical parameters;
- aviation lubricant SM used during tests does not have a negative impact on mechanical parameters, and significantly reduces the possibility of infiltration;
- media applied during tests affect the changes in internal structure of the layer exposed to them. It manifests itself by the increase in propagation of micro-cracks in cement matrix, change in the crystallization and porosity character as well;
- the observed changes in the internal structure of concrete composite and their impact on the decrease of mechanical and useful parameters in the context of the durability of airfield structures is significant and requires further, detailed analysis.

7. References

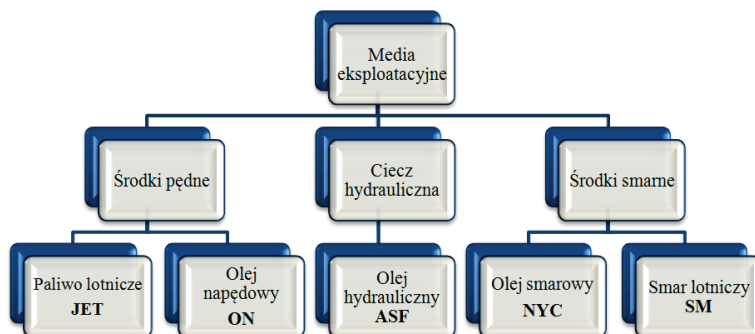
1. Bastian S.: Odporność betonu na oleje impregnacyjne. Cement – Wapno – Gips, nr 7-8, 1960.
2. Blankenhorn P.R., Baileys R.T., Gowen D., Kline D.E., Cady P.D.: The effects of linseed oil on the compressive strength of concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 8, nr 4, 1978.
3. Blankenhorn P.R., Barnes D., Gowen D., Kline D.E., Cady P.D.: Penetration of concrete with various linseed oil/mineral spirits mixtures. Cement and Concrete Research, Vol. 9, nr 3, 1979.
4. Błaszczński T.: Korozja betonu w wyniku oddziaływania substancji węglowodorowych. Cz. 1. Mechanizmy niszczenia betonu przez produkty pochodzenia naftowego, Ochrona przed korozją, nr 4, 2003.
5. Błaszczński T.: Korozja betonu w wyniku oddziaływania substancji węglowodorowych. Cz. 2. Sposób oceny stopnia korozji w wyniku oddziaływania substancji węglowodorowych. Ochrona przed korozją nr 6, 2003.
6. Błaszczński T.: Konstrukcje żelbetowe poddane działaniu produktów ropopochodnych. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Poznańska, 2002.
7. Błaszczński T.: Some effects of crude oil environment on RC structures. Foundation of Civil and Environmental Engineering, No. 2, 2002.
8. Diab H.: Compressive strength performance of low – and high strength concrete soaked in mineral oil. Construction and Building Materials, No. 33, 2012.
9. Faiyadh F.I.: Bond characteristics of oil saturated concrete. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 7, No. 2, 1985.
10. Florek A.: Teoretyczne i techniczne podstawy technologii betonu naftoszczelnego. Praca doktorska, Kraków, 1964.
11. Giergiczny Z., Pużak T., Sokołowski M.: Beton jako kompozyt odporny na działanie cieczy lekkich. Ochrona przed korozją, nr 5, 2008.
12. Glinicki M.A.: Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych. Wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka. Wydawnictwo Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Warszawa, z. 66, 2011.
13. Hironaka M.C., Malvar L.J.: Jet Exhaust Damaged Concrete. Concrete International, Vol. 20, No. 10, 1998.
14. Ksit B.: Olej mineralny – cichy wróg betonu. Budownictwo Technologia Architektura, nr 1, 2004.
15. Ksit B.: Wpływ wybranych parametrów na nośność zaolejonych elementów żelbetowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 2002.
16. Kucharska L.: W/C – wskaźnik wpływu warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów zwykłych i WWB i ich podział. Cement Wapno Beton, vol. 4/66, nr 2, 1999.
17. Kurdowski W.: Chemia cementu i betonu. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków 2010.

18. Linek M.: Beton nawierzchniowy o zwiększonych parametrach fizycznych i mechanicznych na działanie wymuszonych obciążeń temperaturowych. Praca doktorska. Politechnika Świętokrzyska. Kielce 2013.
19. McVay M., Rish J., Sakezless C., Mohsen S., Beatty C.: Cements Resistant to Synthetic Oil, Hydraulic Fluid and Elevated Temperature Environments. *ACI Materials Journal*, Vol. 92, Issue 2, 1995.
20. McVay M.C., Smothson L.D., Manzione Ch.: Chemical damage to airfield concrete aprons form heat and oils. *ACI Material Journals*, Vol. 90, No. 3, 1993.
21. Nita P.: Niektóre własności betonów nawierzchniowych poddanych działaniu środków chemicznych występujących w procesie eksploatacji nawierzchni. *Drogownictwo*, nr 1, Warszawa 1986.
22. Nita P.: Betonowe nawierzchnie lotniskowe. Teoria i wymiarowanie konstrukcji. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2005.
23. Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
24. Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych. Praca zbiorowa, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2003.
25. Runkiewicz L., Konieczny K., Brząk R.: Zmiany wytrzymałości i odkształcalności betonu zaolejonego w konstrukcji. *Przegląd Budowlany*, nr 2, 2002.
26. Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych. *Polski Cement*, Kraków 2002.
27. Shill S.K., Al-Deen S., Ashraf M.: Concrete durability issues due to temperature effects and spillage at military airbase – A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, No. 160, 2018.
28. Watson A.J., Oyeka C.C.: Oil permeability of hardened cement pastes and concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 33, No. 115, 1981.
29. NO-17-A204:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.
30. PN-EN 206:2014 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
31. PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
32. PN-EN 12390-5:2011 Badania betonu. Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
33. PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.

WPLYW MEDIÓW EKSPLOATACYJNYCH NA PARAMETRY BETONU CEMENTOWEGO PRZEZNACZONEGO NA NAWIERZCHNIE LOTNISKOWE

1. Wprowadzenie

Nawierzchnie lotniskowe narażone są na szkodliwe oddziaływanie czynników zewnętrznych w całym okresie ich eksploatacji. Zakres oddziaływania jest zróżnicowany i ściśle zależny od warunków środowiskowych, czasu eksploatacji oraz środków i zabiegów utrzymaniowych prowadzonych na nawierzchniach w celu zagwarantowania bezpieczeństwa ruchu naziemnego. Obciążenie nawierzchni lotniskowych zależy od wielu współzależnych czynników, wśród których najistotniejszym są obciążenia generowane przez statki powietrzne. Mają one charakter statyczny, dynamiczny i termiczny. Obciążenie statyczne rozumiane jest jako maksymalne pionowe oddziaływanie kół goleni głównej samolotu obliczeniowego [22]. Zewnętrzne pionowe obciążenia dynamiczne spowodowane są pracującymi na nawierzchniach statkami powietrznymi. Charakter obciążenia dynamicznego utożsamiany jest z poszczególnymi fazami ruchu statków powietrznych [23]. Swoistość obciążeń nawierzchni to również występowanie zmiennego obciążenia wynikającego z zasad aerodynamiki ruchu samolotu, zależnego od prędkości ruchu samolotu po nawierzchni. Szczególnym rodzajem destrukcyjnego oddziaływania statków powietrznych na nawierzchnie są również cyklicznie występujące wymuszone obciążenia termiczne, powstające na skutek emisji strugi gorących gazów spalinowych z dysz startujących samolotów na warstwę przypowierzchniową betonu [18]. Obecnie niezbędne jest określenie wpływu mediów eksploatacyjnych w procesie użytkowania statków powietrznych i ich oddziaływań na beton cementowy warstwy jezdnej. Ogólny podział mediów eksploatacyjnych wykorzystywany w celach badawczych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Klasyfikacja stosowanych mediów eksploatacyjnych

2. Istota oddziaływań mediów eksploatacyjnych na nawierzchnie lotniskowe – przegląd literatury

Problem negatywnego oddziaływania mediów eksploatacyjnych na nawierzchnie lotniskowe dotychczas nie był dostrzegany w krajowej literaturze technicznej. Nielicznie dostępne informacje dotyczą jedynie wybranych zagadnień w ujęciu ogólnym i nie odnoszą się do wymagań stawianych nawierzchniom lotniskowym.

Autor pracy [1] wykazał, że wykonane kształtki betonowe zanurzone w oleju kreatorowym po okresie 2 miesięcy wykazują obniżenie wytrzymałości na ściskanie o ok. 35% i zginanie o ok. 15% w stosunku do próbek betonowych przechowywanych w wodzie. Jako przyczynę redukcji wytrzymałości autor nadmienia możliwość „smarowania” wewnętrznych składników tworzywa cementowego.

Inne prace badawcze [2, 3] dotyczyły penetracji betonu przez zróżnicowane mieszaniny gotowanego oleju lnianego z benzyną lądową. Roztwory te wykorzystywano jako powłoki zabezpieczające betonowe pokłady mostowe przed wnikaniem chlorków. Badania wykonane dla betonów o zmiennym stosunku w/c oraz betonów o zróżnicowanej zawartości procentowej oleju lnianego do benzyny lądowej (100/0, 90/10, 75/25, 50/50, 30/70). Wykazano, że najgłębiej penetruje strukturę betonu mieszanina 30% oleju lnianego z 70% zawartością rozpuszczalnika (7,6 cm), co autorzy tłumaczą najmniejszą lepkością mieszaniny. Zauważono również, że im wyższy wskaźnik w/c, tym wyższa głębokość penetracji roztworu oraz nasiąkliwość. Przedstawione wyniki badań [2] wytrzymałości na ściskanie betonu impregnowanego gotowanym olejem lnianym wskazują na skokową zmianę badanego parametru. Po 7 dniach od impregnacji betonu nastąpiło obniżenie jego wytrzymałości o ponad 25%. Z kolei po 120 dniach nastąpił wzrost wytrzymałości o 6,5%. Obniżenie wytrzymałości w początkowym okresie wynika z chemicznego ataku kwasów na strukturę hydratyzowanego cementu. Wzrost wytrzymałości w dłuższym okresie należy tłumaczyć zjawiskiem krzepnięcia oraz polimeryzacją oleju lnianego w wolnych przestrzeniach betonu.

Badania przepuszczalności oleju przez beton o różnym stosunku w/c wykonał również autor pracy [28]. Przeprowadzone testy dla betonu wykonanego z kruszywa kwarcytowego dowiodły, że im większa nasiąkliwość betonu olejem, tym większa redukcja jego wytrzymałości. Autor przedstawił wyniki pokazujące obniżenie wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 2% do 11% po 24 tygodniach przechowywania próbek betonowych w oleju. Poziom odniesienia stanowiły próbki betonu kontrolnego przechowywane w warunkach powietrzno-suchych. Autor wykazał, że przepuszczalność matrycy cementowej zależy od jej porowatości, która jest regulowana głównie przez stosunek w/c, stopień hydratacji cementu oraz stopień mialkości cementu. Przepuszczalność betonu jest funkcją porowatości matrycy cementowej.

Eksperymentalne badania dotyczące chemicznego niszczenia lotniskowych betonowych płyt postojowych pod wpływem cyklicznego oddziaływania temperatury emitowanej z dysz silników turbodrzutowych w obecności oleju silnikowego i płynu hydraulicznego przedstawiono w pracach [13, 19, 20, 21, 27]. Autorzy zaobserwowali uszkodzenia rzeczywistej nawierzchni betonowej w postaci rozwarstwień na niewielkiej głębokości i łuszczenia warstwy przypowierzchniowej betonu. Destrukcja betonu występowała w miejscach oddziaływania gazów spalinowych z dysz wylotowych samolotów F/A-18 oraz B-1 i na obszarach wycieku płynów eksploatacyjnych. Jako możliwe procesy chemiczne związane z występowaniem mediów eksploatacyjnych na nawierzchni autorzy [13, 19, 20, 21, 27] wymieniają pochłanianie wodorotlenku wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$, uwodnionych krzemianów oraz glinianów. Zaobserwowali, że powstaje porowata matryca cementowa ze słabo związanymi ziarnami kruszywa. W badaniach uwzględniono olej silnikowy i olej hydrauliczny, złożony odpowiednio w 95% i 30% z estrów. W wyniku przereagowania wodorotlenku wapnia następuje m.in. obniżenie wartości pH betonu. Ponieważ beton ma wartość pH większą niż 12, a temperatura nawierzchni oscylowała ok. 175°C, reakcje zachodziły bardzo szybko w górnej warstwie betonu.

Polskie doświadczenia z oddziaływaniem substancji pochodzących z przerobu ropy naftowej przedstawiono w publikacjach [4-7] oraz [14, 15]. Dostrzeżony problem dotyczył betonów konstrukcyjnych w stropach budynków przemysłowych, w których przechowywane były oleje mineralne, a także fundamentów stacji transformatorowych. W publikacjach [14, 15] jako główne miejsce gromadzenia się substancji olejowych wymieniono strefę przyczepności pomiędzy matrycą cementową a kruszywem, tzw. strefę kontaktową. Badania przedstawione w [9, 14, 15] wykazały, że beton o klasie wytrzymałości powyżej C25/30, zwiększa masę do 1,5% wskutek nasączenia olejem, powodując tym samym nieznaczny spadek wytrzymałości. Natomiast dla betonu o nasiąkliwości 3,7% olejem mineralnym spadek ten wynosi 40%. Autorzy zwrócili uwagę, że uziarnienie kruszywa, pomijając jego rodzaj, przesądza o obniżeniu wytrzymałości betonu. Dla tej samej klasy betonu, redukcja wytrzymałości jest większa dla betonu z kruszywem o uziarnieniu do 20 mm niż o uziarnieniu do 10 mm.

W publikacji [25] omówiono badania oddziaływania na beton, przez okres 4 lat, mineralnego oleju maszynowego L-AN 22 oraz emulsji chłodzącej Emulgol ES12 na bazie oleju mineralnego. Przedstawione wyniki dowiodły, że młody beton nasycony olejem

mineralnym powoduje obniżenie parametrów wytrzymałościowych o ok. 15÷25%, natomiast w przypadku emulsji chłodząco-smarującej o 20÷30%. Wśród przyczyn wymienia się stopniowe wnikanie oleju w pory betonu przy jednoczesnym wypychaniu z nich wody. Olej, będąc obojętny w stosunku do tworzenia się sieci krystalicznych w procesie hydratacji cementu, ogranicza typowy wzrost jego wytrzymałości w czasie. Wnikając w strukturę betonu osłabia wewnętrzne wiązania oraz zwiększa poślizg na granicy kruszywo – spoiwo. Jednak przy badaniu współczynnika sprężystości pod wpływem oddziaływania cieczy istotne jest wypełnienie porów cieczą. Jeżeli pory w betonie są wypełnione cieczą, to współczynnik sprężystości jest większy aż do momentu, gdy nastąpi wyciskanie cieczy z porów.

Przedstawione badania autora [4, 5, 6] nad wpływem olejów mineralnych na zaprawy i betony cementowe, wskazują na brak znaczącego wpływu lepkości badanych substancji na stopień degradacji betonu. Końcowy efekt oddziaływania trzech różnych olejów: TU-20, M-40 i H-70 o lepkości kinematycznej w temperaturze 20°C odpowiednio 81,0 mm²/s, 211,4 mm²/s i 383,0 mm²/s jest znacząco różny. Po okresie oddziaływania 6 lat w przypadku wytrzymałości na ściskanie autor odnotował obniżenie wytrzymałości od 10% w przypadku oleju M-40 do 55% dla oleju H-70, natomiast olej M-40 nie spowodował spadku wytrzymałości poniżej wartości początkowej.

Podobne badania dotyczące wpływu oleju przekładniowego na wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu przedstawiono również w pracy [8]. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że obecność oleju spowodowała obniżenie wytrzymałości betonu na ściskanie od 12% do 17%. Stwierdzono również, że im większa nasiąkliwość betonu olejem, tym większa jest utrata jego wytrzymałości.

Mechanizm niszczenia struktury betonu przez produkty ropopochodne jest procesem złożonym. Wśród czynników chemicznych wymienia się: obecność bakterii tlenowych i bakterii siarkowych w odpowiednim środowisku.

Działanie kwasów na beton związane jest z reagowaniem z wodorotlenkiem wapnia, a także ze związkami glinu. Kwas octowy reaguje z wodorotlenkiem wapnia lub tlenkiem wapnia, tworząc octan wapniowy. Z kolei inne kwasy organiczne reagują z Ca(OH)₂, tworząc miękkie rozpuszczalne mydła wapniowe. W efekcie końcowym może dojść do rozkładu krzemianów wapniowych, co prowadzi do rozmiękczenia lub spękania struktury betonu [4, 5].

Reakcje w wyniku oddziaływania kwasu siarkowego i związków siarki z rozpuszczalnym wapniem czynią strukturę betonu porowatą. W obecności siarczanów powstają sole pęczniące na skutek tworzenia się soli Candlota ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), które prowadzą do pęknięć i w konsekwencji do niszczenia betonu.

Wśród zjawisk fizykochemicznych prowadzących do zmian struktury betonu wymienia się redukcję energii powierzchniowej przez adsorpcję substancji oddziałującej, która może być przyczyną efektu rozklinowującego.

Efekt rozklinowujący jest zjawiskiem wykorzystywanym w technologiach obróbki materiałów twardych – w szczególności w toczeniu i piłowaniu. W obecności cząstek polarnych obserwuje się uplastycznienie (rozmiękczenie) powierzchni. Gdy na powierzchni

ciała stałego istnieje mikrorysa, polarne molekuly wnikają w strukturę materiału, przemieszczając się w kierunku wierzchołka rysy. W efekcie ma miejsce parcie rozklinowujące, co w konsekwencji prowadzi do osłabienia wiązań i dalszego poszerzania szczeliny [6].

Mechanizm fizycznego niszczenia struktury betonu występuje wówczas, gdy na zaolejony beton oddziałuje wysoka temperatura, prowadząc do znaczącej rozszerzalności oleju w porach betonu. W efekcie następuje wzrost ciśnienia wewnętrznego, który doprowadza do pojawienia się mikrorys w strukturze betonu.

Właściwości mechaniczne kompozytu betonowego zależą od właściwości zaczynu i kruszywa oraz od strefy kontaktowej pomiędzy kruszywem a zaczynem. Strefa kontaktowa różni się znacząco od otaczającego ją zaczynu i kruszywa pod względem morfologii i gęstości. Niezależnie od rodzaju kruszywa, strefa ta ma ok. 50 μm grubości. Jest strefą o największej porowatości i przepuszczalności w całej objętości zaczynu, decyduje zatem nie tylko o parametrach mechanicznych kompozytu betonowego, ale również o jego trwałości. Z kolei obecny w tej strefie, wodorotlenek wapnia jest produktem najsłabszym i najmniej odpornym na agresję chemiczną [16, 17].

W pracach [5,6] wykazano, że strefy kontaktowe betonów o różnym stosunku kruszywa do cementu są podstawowymi przestrzeniami, które penetrują produkty ropopochodne, niszcząc strukturę kompozytu betonowego.

3. Wymagania dla lotniskowego betonu nawierzchniowego

W projektowaniu receptury nawierzchniowego betonu lotniskowego uwzględniono czynniki środowiskowe definiowane przez normy [29, 30], odnosząc się do korozji spowodowanej karbonatyzacją XC4, chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej XD3, agresji spowodowanej cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem XF4 oraz agresji wywołanej ścieraniem XM1.

W tab. 1 przedstawiono normowe wymagania wartości granicznych składu mieszanek betonowych przeznaczonych na nawierzchnie lotniskowe z uwzględnieniem wpływu agresji środowiska.

W mieszance betonowej uwzględniana jest woda w ilości zależnej od przyjętego stosunku w/c (maksymalny stosunek w/c zgodnie z [29] wynosi 0,4). Wartość pH wody powinna być ≥ 4 , zawartość $\text{H}_2\text{S} \leq 20 \text{ mg/dm}^3$, zawartość siarczanów $\leq 600 \text{ mg/dm}^3$, a zawartość cukrów $\leq 500 \text{ mg/dm}^3$. Najistotniejszym składnikiem mieszanki betonowej jest kruszywo. Zawartość kruszywa w mieszance zwykle wynosi 70-75%. Rodzaj użytego kruszywa ma podstawowe znaczenie w kształtowaniu parametrów stwardniałego betonu, na cele badawcze przyjęto grys granitowy frakcji 2/8 mm i 8/16 mm. Krzywe uziarnienia projektowanych mieszanek powinny zawierać się pomiędzy krzywymi granicznymi (dolną i górną) wyznaczającymi zakres dobrego uziarnienia, zgodnie z [29]. W celu oceny przydatności zaprojektowanych betonów do wbudowania w konstrukcję nawierzchni

lotniskowych wymagane jest, zgodnie z [29], określenie ich cech fizycznych i mechanicznych w założonym okresie dojrzewania (normowo po 28 dniach).

Tabela 1

Wymagania projektowe w zależności od rodzaju klasy ekspozycji

Klasa ekspozycji	Wartości graniczne			
	Maksymalny stosunek w/c	Minimalna zawartość cementu [kg]	Minimalna klasa betonu	Zawartość powietrza w mieszance betonowej
XC4	0,50	300	C30/37	-
XD3	0,45	320	C35/45	-
XF4	0,45	340	C30/37	4,0%
XM1	0,55	300	C30/37	-

4. Cel i zakres badań doświadczalnych

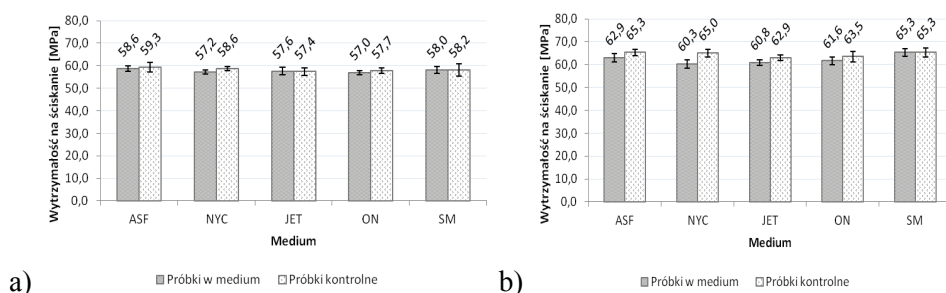
Celem badań laboratoryjnych było określenie wpływu zastosowanych mediów eksploatacyjnych na zmianę parametrów stwardniałego betonu w kontekście jego trwałości. Zaprojektowane mieszanki mineralne spełniały wymagania normy [29]. W stosie okruszowym uwzględniono grys granitowy (Gg) o uziarnieniu 2/8 mm i 8/16 mm. Udział poszczególnych frakcji w stosie okruszowym mieszanki wynosił odpowiednio 35% (860 kg/m³) i 24% (600 kg/m³). W mieszankach zastosowano też kruszywo drobne (Kd), odpowiadające wymaganiami [29]. Ilość kruszywa drobnego w mieszance wynosiła 540 kg/m³. Wykorzystano wodę w ilości 136 kg/m³, domieszkę napowietrzającą 1,7 kg/m³ i superplastyfikator w ilości 3,7 kg/m³. Badaniami objęte zostały betony klasy C30/37, właściwe dla nawierzchni lotniskowych. Badania obejmowały pięć serii – po jednej dla każdego z wybranych mediów. W ramach każdej serii analizowano beton kontrolny – przechowywany w warunkach normowych oraz beton narażony na działanie jednego z mediów: ASF, NYC, JET, ON, SM (przyjęto oznaczenia zgodnie z opisem na rys. 1). Przygotowane betony do 28 dnia kondycjonowano w wodzie o temperaturze 20 ± 2°C, a następnie pozostawiono w warunkach powietrzno-suchych przez 14 dni i przeznaczono do pielęgnacji w wybranych mediach. Serię próbek przeznaczonych do określenia oddziaływania mediów eksploatacyjnych umieszczano w poszczególnych cieczach eksploatacyjnych (ASF, NYC, JET, ON) do wysokości 2 cm. W przypadku smaru SM nakładano na górną powierzchnię próbek warstwę o grubości 2 mm. W ramach oceny wpływu mediów eksploatacyjnych na parametry stwardniałego betonu określono:

- wytrzymałość na ściskanie zgodnie z wytycznymi normy [31] po 28 dniach pielęgnacji oraz po 168 dniach oddziaływania wybranych mediów;
- wytrzymałość na zginanie wg [32] po 28 dniach pielęgnacji;
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, wg [33] po 28 dniach pielęgnacji;
- podciąganie kapilarne i infiltrację, badanie wykonano na 6 próbkach sześciennych o krawędzi 15 cm, które przed rozpoczęciem badań przechowywane były przez 14 dni w warunkach powietrzno-suchych w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

W celu oceny wpływu zastosowanych mediów na zmiany w budowie wewnętrznej, betony poddano obserwacjom w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM). Preparatyka próbek oraz interpretacja uzyskanych wyników były zgodne z opisanymi w literaturze [12, 18, 24]. Z betonów kontrolnych i narażonych na działanie mediów przygotowano świeże przełamy. Powierzchnia preparatów poddana obserwacjom w SEM wynosiła każdorazowo więcej niż 1 cm^2 , a zakres stosowanych powiększeń przyjmowano od 200x do 100 000x.

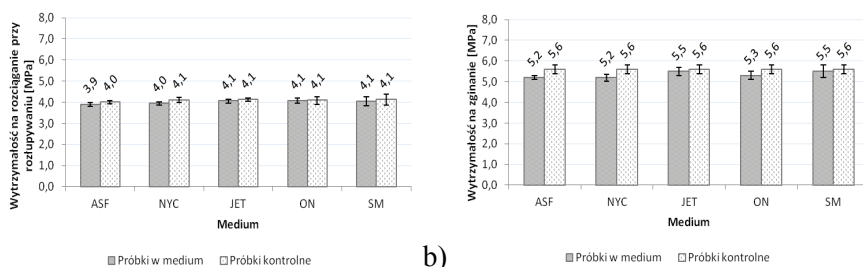
5. Wyniki badań laboratoryjnych

Na podstawie uzyskanych wyników badań (rys. 2a i 2b) stwierdzono, że wpływ analizowanych mediów na średnią wytrzymałość na ściskanie betonu jest zależny od czasu ich oddziaływania. Po 28 dniach pielęgnacji wpływ ten nie jest istotny. Zarejestrowano obniżenie badanego parametru maksymalnie o 2,4% w przypadku serii betonu przechowywanego w NYC oraz o 1,2% dla serii ASF i ON. Wydłużenie okresu oddziaływania mediów na beton do 168 dni potęguje niekorzystny wpływ na badany parametr. W przypadku serii ON, JET i ASF stwierdzono spadek średniej wytrzymałości na ściskanie o ponad 3%, a dla serii NYC spadek był najwyższy i wynosił ponad 7%. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono również, że smar SM nie wpływa na zmianę badanego parametru.



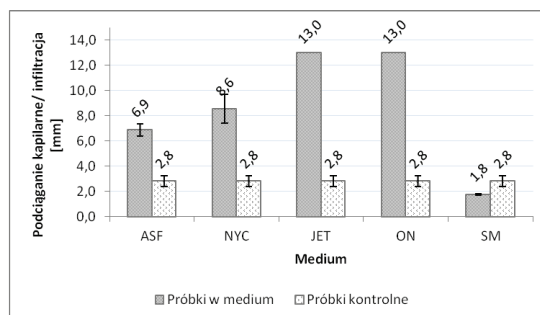
Rys. 2. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu poddanego oddziaływaniu mediów eksploatacyjnych przez okres 28 (a) i 168 (b) dni

Na podstawie uzyskanych wyników badań (rys. 3a i 3b) nie stwierdzono wpływu analizowanych mediów na średnią wytrzymałość na rozciąganie przy rozluźnianiu oraz na średnią wytrzymałość na zginanie. Rejestrowane parametry utrzymują się na porównywalnym poziomie.



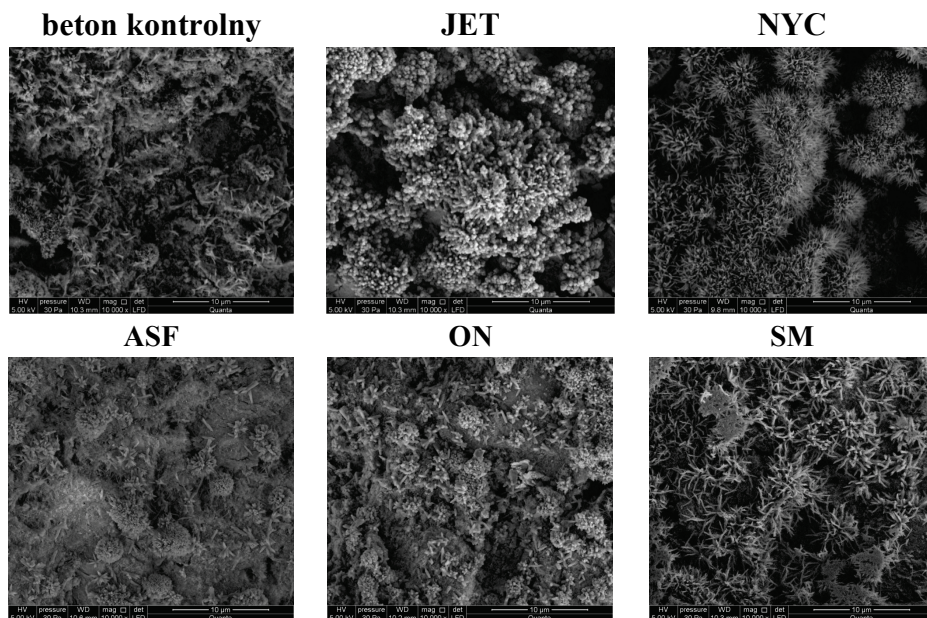
Rys. 3. Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy rozluźnianiu (a) i wytrzymałość na zginanie (b) betonu poddanego oddziaływaniu mediów eksploatacyjnych przez okres 28 dni

Na podstawie uzyskanych wyników badań (rys. 4) stwierdzono, że wpływ analizowanych mediów na wielkość podciągania kapilarnego jest istotny. W przypadku ASF i NYC głębokość penetracji zwiększyła się odpowiednio dwukrotnie i trzykrotnie. Wyraźnie negatywny wpływ na analizowaną cechę ma również JET i ON, w przypadku których ograniczeniem głębokości penetracji był wymiar analizowanej próbki. Wyraźnie odmienny – korzystny – wpływ stwierdzono w przypadku smaru SM. Wykorzystanie tego medium przyczyniło się do obniżenia infiltracji w głąb betonu.

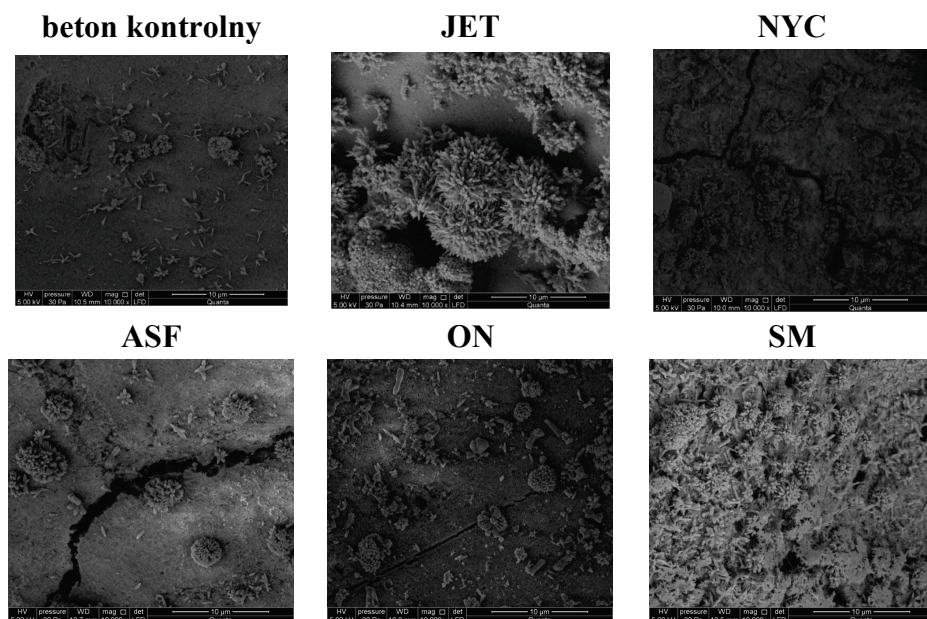


Rys. 4. Średnia wartość podciągania kapilarnego mediów eksploatacyjnych oraz infiltracji smaru lotniczego w okresie 28 dni

Na podstawie obserwacji w SEM stwierdzono wpływ analizowanych mediów na zmiany w budowie wewnętrznej kompozytów betonowych. W przypadku matrycy cementowej zmiany uległy m.in. produkty hydratacji w strefie narażonej na działanie mediów eksploatacyjnych (rys. 5). Obserwowano zwiększone rozwartości mikrospeków względem betonu kontrolnego i zmiany w charakterystyce porowatości, przejawiające się odmienną krystalizacją (rys. 6).



Rys. 5. Budowa matrycy cementowej w betonie kontrolnym oraz betonie narażonym na działanie mediów: JET, NYC, ASF, ON i SM



Rys. 6. Budowa pustki powietrznej w betonie kontrolnym oraz betonie narażonym na działanie mediów: JET, NYC, ASF, ON i SM

6. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych stwierdzono, że:

- analizowane ciecze eksploatacyjne (ASF, NYC, JET, ON) wpływają na zmianę parametrów stwardniałego betonu, szczególnie w wydłużonym okresie oddziaływania. Zarejestrowano obniżenie parametrów mechanicznych i fizycznych;
- wykorzystywany w badaniach smar SM nie wpływa negatywnie na zmianę parametrów mechanicznych, a ponadto wyraźnie ogranicza możliwość infiltracji;
- wykorzystane w badaniach doświadczalnych media wpływają na zmiany w budowie wewnętrznej warstwy narażonej na ich oddziaływanie, przejawia się to zwiększeniem propagacji mikrospęknięć w matrycy cementowej oraz zmianą występującej krystalizacji i charakterystyki porowatości;
- zaobserwowane zmiany w budowie wewnętrznej kompozytu betonowego oraz ich wpływ na obniżenie parametrów mechanicznych i użytkowych w ujęciu trwałości konstrukcji lotniskowych jest istotny i wymaga dalszych, szczegółowych analiz.

7. Literatura

1. Bastian S.: Odporność betonu na oleje impregnacyjne. Cement – Wapno – Gips, nr 7-8, 1960.
2. Blankenhorn P.R., Baileys R.T., Gowen D., Kline D.E., Cady P.D.: The effects of linseed oil on the compressive strength of concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 8, nr 4, 1978.
3. Blankenhorn P.R., Barnes D., Gowen D., Kline D.E., Cady P.D.: Penetration of concrete with various linseed oil/mineral spirits mixtures. Cement and Concrete Research, Vol. 9, nr 3, 1979.
4. Błaszczyński T.: Korozja betonu w wyniku oddziaływania substancji węglowodorowych. Cz. 1. Mechanizmy niszczenia betonu przez produkty pochodzenia naftowego, Ochrona przed korozją, nr 4, 2003.
5. Błaszczyński T.: Korozja betonu w wyniku oddziaływania substancji węglowodorowych. Cz. 2. Sposób oceny stopnia korozji w wyniku oddziaływania substancji węglowodorowych. Ochrona przed korozją nr 6, 2003.
6. Błaszczyński T.: Konstrukcje żelbetowe poddane działaniu produktów ropopochodnych. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Poznańska, 2002.
7. Błaszczyński T.: Some effects of crude oil environment on RC structures. Foundation of Civil and Environmental Engineering, No. 2, 2002.
8. Diab H.: Compressive strength performance of low – and high strength concrete soaked in mineral oil. Construction and Building Materials, No. 33, 2012.

9. Faiyadh F.I.: Bond characteristics of oil saturated concrete. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 7, No. 2, 1985.
10. Florek A.: Teoretyczne i techniczne podstawy technologii betonu naftoszczelnego. Praca doktorska, Kraków, 1964.
11. Giergiczny Z., Pużak T., Sokołowski M.: Beton jako kompozyt odporny na działanie cieczy lekkich. *Ochrona przed korozją*, nr 5, 2008.
12. Glinicki M.A.: Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych. Wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka. Wydawnictwo Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Warszawa, z. 66, 2011.
13. Hironaka M.C., Malvar L.J.: Jet Exhaust Damaged Concrete. *Concrete International*, Vol. 20, No. 10, 1998.
14. Ksit B.: Olej mineralny – cichy wróg betonu. *Budownictwo Technologia Architektura*, nr 1, 2004.
15. Ksit B.: Wpływ wybranych parametrów na nośność zaolejonych elementów żelbetowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 2002.
16. Kucharska L.: W/C – wskaźnik wpływu warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów zwykłych i WWB i ich podział. *Cement Wapno Beton*, vol. 4/66, nr 2, 1999.
17. Kurdowski W.: *Chemia cementu i betonu*. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków 2010.
18. Linek M.: Beton nawierzchniowy o zwiększonych parametrach fizycznych i mechanicznych na działanie wymuszonych obciążeń temperaturowych. Praca doktorska. Politechnika Świętokrzyska. Kielce 2013.
19. McVay M., Rish J., Sakezless C., Mohsen S., Beatty C.: Cements Resistant to Synthetic Oil, Hydraulic Fluid and Elevated Temperature Environments. *ACI Materials Journal*, Vol. 92, Issue 2, 1995.
20. McVay M.C., Smothson L.D., Manzione Ch.: Chemical damage to airfield concrete aprons form heat and oils. *ACI Material Journals*, Vol. 90, No. 3, 1993.
21. Nita P.: Niektóre własności betonów nawierzchniowych poddanych działaniu środków chemicznych występujących w procesie eksploatacji nawierzchni. *Drogownictwo*, nr 1, Warszawa 1986.
22. Nita P.: *Betonowe nawierzchnie lotniskowe. Teoria i wymiarowanie konstrukcji*. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2005.
23. Nita P.: *Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
24. *Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych*. Praca zbiorowa, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2003.
25. Runkiewicz L., Konieczny K., Brzęk R.: Zmiany wytrzymałości i odkształcalności betonu zaolejonego w konstrukcji. *Przegląd Budowlany*, nr 2, 2002.
26. Rusin Z.: *Technologia betonów mrozoodpornych*. Polski Cement, Kraków 2002.

27. Shill S.K., Al.-Deen S., Ashraf M.: Concrete durability issues due to temperature effects and spillage at military airbase – A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, No. 160, 2018.
28. Watson A.J., Oyeka C.C.: Oil permeability of hardened cement pastes and concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 33, No. 115, 1981.
29. NO-17-A204:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.
30. PN-EN 206:2014 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
31. PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
32. PN-EN 12390-5:2011 Badania betonu. Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
33. PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.