

STRUCTURE AND ENVIRONMENT

ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENTAL ENGINEERING, ENERGY AND GEOMATIC

No. 4/2019 vol. 11 e-ISSN 2657-6902 www.sae.tu.kielce.pl KIELCE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Contents

structure

ELŻBIETA HORSZCZARUK

PROPERTIES OF CEMENT MORTARS MODIFIED WITH COMMERCIAL NANOSILICA

WŁAŚCIWOŚCI ZAPRAW CEMENTOWYCH MODYFIKOWANYCH NANOKRZEMIONKĄ KOMERCYJNĄ 247

ANNA SKAWIŃSKA, TOMASZ FOSZCZ

STUDY OF RUBBER GRANULES IMPACT ON SELECTED MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT MORTARS

BADANIE WPŁYWU GRANULATU GUMOWEGO NA KSZTAŁTOWANIE WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH

ZAPRAW CEMENTOWYCH 256

MAŁGORZATA LINEK, MARIUSZ WESOŁOWSKI

SELECTED ASPECTS OF EVALUATING THE TECHNICAL CONDITION OF CONCRETE AIRPORT PAVEMENTS IN TERMS OF SERVICE LIFE

WYBRANE ASPEKTY OCENY STANU TECHNICZNEGO BETONOWYCH NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH

W UJĘCIU TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ 265

environment

NATALIA KRAWCZYK, ZDZISŁAW PIASTA

PRELIMINARY TEST RESULTS OF THERMAL COMFORT IN A CLASSROOM

WSTĘPNE WYNIKI BADAŃ KOMFORTU CIEPLNEGO W SALI LEKCYJNEJ 281

ROBERT KOWALIK, JAROSŁAW GAWDZIK, BARBARA GAWDZIK

RISK ANALYSIS OF ACCUMULATION OF HEAVY METALS FROM SEWAGE SLUDGE IN SOIL

FROM THE SEWAGE TREATMENT PLANT IN STARACHOWICE

ANALIZA RYZYKA KUMULACJI METALI CIĘŻKICH Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH W GLEBIE POCHODZĄCYCH

Z OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W STARACHOWICACH 287

ABSTRACTS 297

HOW TO PREPARE THE MANUSCRIPT 303

THE REVIEW PROCESS 304

Editor-in-Chief:

Prof. Zdzisław OWSIAK – Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology (Poland)

International Advisory Board:

Chairman: Prof. Wiesław TRĄMPCZYŃSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Vadim ABIZOW – Kyiv National University of Technologies and Design (Ukraine)
Prof. Satoshi AKAGAWA – Hokkaido University, Sapporo (Japan)
Prof. Tomasz ARCISZEWSKI – George Mason University (USA)
Prof. Elżbieta BEZAK-MAZUR – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Mark BOMBERG – McMaster University (Canada)
Prof. Jan BUJNAK – University of Žilina (Slovakia)
Prof. Dorota CHWIEDUK – Warsaw University of Technology (Poland)
Prof. Barbara GOSZCZYŃSKA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Krystyna GURANOWSKA-GRUSZECKA – Warsaw University of Technology (Poland)
Prof. Jerzy HOŁA – Wrocław University of Science and Technology (Poland)
Prof. Go IWAHANA – University of Alaska Fairbanks (USA)
Prof. Lucjan KAMIONKA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Andrej KAPJOR – University of Žilina (Slovakia)
Prof. Zbigniew KOWAL – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Tomasz KOZŁOWSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Andrzej KULICZKOWSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Józef MELCER – University of Žilina (Slovakia)
Prof. Mikhail NEMCHINOV – Moscow State Automobile and Road Technical University MADI (Russia)
Prof. Andrzej S. NOWAK – Auburn University (USA)
Prof. Ana Cristina Dinis Vicente PARDAL – Polytechnic Institute of Beja (Portugal)
Prof. Wojciech G. PIASTA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jorge Cruz PINTO – Universidade de Lisboa (Portugal)
Prof. Jerzy Z. PIOTROWSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Karel POSPÍŠIL – The Transport Research Centre CDV (Czech Republic)
Prof. Claude VAN ROOTEN – Belgian Road Research Centre (Belgium)
Prof. Zbigniew RUSIN – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Wacław SERUGA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jacek SZEWCZYK – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jerzy WAWRZEŃCZYK – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Bogdan WOLSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Maria ŻYGADŁO – Kielce University of Technology (Poland)

Associate Editors:

Prof. Lidia DĄBEK – Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Marek IWAŃSKI – Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology (Poland)

Secretary of the Editor Board:

Łukasz ORMAN, Ph.D., D.Sc. – Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology (Poland)

Photos on the cover – author Agnieszka Wdowiak

www.sae.tu.kielce.pl

sae@tu.kielce.pl

The quarterly printed issues of Structure and Environment are their original versions

The Journal published by the Kielce University of Technology

PL ISSN 2657-6902

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2019

25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, tel. 41 34 24 581

www.wydawnictwo.tu.kielce.pl

Index Copernicus Value(ICV) za rok 2018 = 96.84



Kielce University of Technology
2019

INDEX  COPERNICUS
I N T E R N A T I O N A L



structure
structure



ELŻBIETA HORSZCZARUK
West Pomeranian University of Technology Szczecin
e-mail: Elzbieta.Horszczaruk@zut.edu.pl

Manuscript submitted 2019.08.13 – revised 2019.09.20,
initially accepted for publication 2019.10.22, published in December 2019

PROPERTIES OF CEMENT MORTARS MODIFIED WITH COMMERCIAL NANOSILICA

WŁAŚCIWOŚCI ZAPRAW CEMENTOWYCH MODYFIKOWANYCH NANOKRZEMIONKĄ KOMERCYJNĄ

DOI: 10.30540/sae-2019-018

Abstract

Nanosilica as a commercial product dedicated to construction remains a relatively expensive chemical admixture for concrete and cement mortars. Economic considerations are a major barrier to the industrial use of nanosilica in the building materials industry. With respect to nanosilica, the following have been confirmed: accelerating the effect of C_3S hydration, accelerated C-S-H gel formation, modification of the mixture viscosity, improvement of cement matrix tightness, also at high temperature. The efficiency of nanosilica depends on its even distribution in the composite, therefore disagglomeration is necessary for the proper design of mortar or concrete. The article presents the results of tests on cement mortars modified with different amounts of colloidal nanosilica. It is an nano- SiO_2 admixture in the form of an aqueous dispersion containing up to 50% pure nanosilica, which is produced on an industrial scale as an admixture for concrete and cement mortars. Dispersions of nanosilica in composite using ultrasound were used. The possibilities of using nanosilica as an admixture improving the early strength of cement composites were pointed out.

Keywords: nanosilica, mechanical properties, cement mortars

Streszczenie

Nanokrzemionka jako produkt komercyjny dedykowany dla budownictwa pozostaje nadal stosunkowo drogą domieszką chemiczną do betonów i zapraw cementowych. Względy ekonomiczne są główną barierą w przemysłowym zastosowaniu nanokrzemionki w przemyśle materiałów budowlanych. W odniesieniu do nanokrzemionki potwierdzono: przyspieszające działanie na hydratację C_3S , przyspieszone tworzenia się żelu C-S-H, modyfikację lepkości mieszanki, poprawę szczelności matrycy cementowej, także w warunkach wysokiej temperatury. Wydajność nanokrzemionki zależy od jej równomiernego rozmieszczenia w kompozycie, dlatego dezaglomeracja jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania zaprawy lub betonu. W artykule przedstawiono wyniki badań zapraw cementowych modyfikowanych różną ilością nanokrzemionki koloidalnej. Jest to domieszka nano- SiO_2 w postaci wodnej dyspersji zawierającej do 50% czystej nanokrzemionki, która produkowana jest na skalę przemysłową jako domieszka do betonów i zapraw cementowych. W badaniach zastosowano dyspersję nanokrzemionki w kompozycie z wykorzystaniem ultradźwięków. Wskazano na możliwości zastosowania nanokrzemionki jako domieszki poprawiającej wczesną wytrzymałość kompozytów cementowych.

Słowa kluczowe: nanokrzemionka, właściwości mechaniczne, zaprawy cementowe

1. INTRODUCTION

Nano- SiO_2 , also known as silica nanoparticles or nanosilica, is silicon dioxide with the particles diameter less than 100 nm. Nanosilica is one of the first nanomaterials, whose impact on the properties of the cement composites has been the most

1. WPROWADZENIE

Nano- SiO_2 , znany również jako nanocząstki krzemionki lub nanokrzemionka, jest ditlenkiem krzemu o średnicy mniejszej niż 100 nm. Nanokrzemionka jest jednym z pierwszych nanomateriałów, którego wpływ na właściwości kompozytów cementowych

widely studied, except to the carbon nanotubes. Application of nano-SiO₂ did not lead yet to such spectacular achievements in the concrete technology as the use of silica fumes, usually called microsilica. However, nanosilica is considered the basic nanomaterial for creation the so-called nano-engineered concrete [1], i.e. concrete not only of very high strength, but also of special functional properties, which can be obtained by using nanomaterials. There are many different chemical methods of nanosilica production, eg. pyrolysis of tetraalkoxysilane or tetrachlorsilane (this method leads to the obtaining of the powdered nanosilica with irregular shape and size of particles), silica precipitation (from the solution of sodium silicate in the acid environment) or the sol-gel method [2]. These methods, due to the high costs of production, do not allow to industrially use the nanosilica for the production of cement and concrete. The cheapest method of the industrial production of nanosilica for the construction purposes is the grinding method, however, the nanostructures obtained with this method are heterogeneous and contaminated [3]. Most of the papers dealing with the modification of the cement composites with nanosilica presents the results of tests conducted with the use of chemically synthesized nano-SiO₂. The results of the researches have confirmed the accelerating effect of the nanosilica on the hydration of C₃S and production of C-S-H gel [4], modification of the viscosity [5] and improvement of the tightness of the cement matrix [6], also at the high temperature [7].

As the majority of the nanomaterials, nanosilica shows the tendency to agglomerate. The efficiency of nanosilica depends on its homogeneous distribution in the composite, therefore, its disagglomeration is necessary for the proper designing of the cement composite. The use of a superplasticizer is often not sufficient. The effective, but also expensive, method of application of nano-SiO₂ is combination of sonication (ultrasounds) with the fast mechanical stirring [8].

Nanosilica as the commercial product, dedicated to the construction industry, is produced in the form of powder obtained by grinding of the waste cullet. The product contains the particles of nano-SiO₂ with diameters 60-300 nm and is dedicated as the admixture for the high-performance concretes, decorative concretes and shotcretes. The nano-SiO₂ occurs also in the form of the water suspension,

został najszerzej zbadany oprócz nanorurek węglowych. Zastosowanie nano-SiO₂ nie doprowadziło jeszcze do tak spektakularnych osiągnięć w dziedzinie technologii betonu jak zastosowanie pyłów krzemionkowych, popularnie zwanych mikrokrzemionką. Nanokrzemionka jest jednak uważana za podstawowy nanomateriał do tworzenia tzw. nanoinżynierskiego betonu [1], tj. betonu nie tylko o bardzo wysokiej wytrzymałości, ale także specjalnych właściwościach użytkowych, których uzyskanie możliwe jest dzięki zastosowaniu nanomateriałów. Istnieje wiele różnych metod chemicznych wytwarzania nanokrzemionki np. piroliza tetraalkoksylanu lub tertrachlorosilanu (metoda prowadząca do otrzymania sproszkowanej nanokrzemionki o nieregularnym kształcie i wielkości cząstek), strącanie krzemionki (w środowisku kwaśnym z roztworu krzemianu sodowego) czy metody zol-żel [2]. Metody te z uwagi na wysokie koszty produkcji nie pozwalają na przemysłowe wykorzystanie nanokrzemionki w przemyśle produkcji cementu i betonu. Najtańszą metodą przemysłowej produkcji nanokrzemionki na potrzeby budownictwa pozostaje metoda mielenia, jednak nanostruktury pozyskiwane tą metodą są niejednorodne i zanieczyszczone [3]. Większość publikacji dotyczących modyfikacji kompozytów cementowych nanokrzemionką prezentuje wyniki badań z zastosowaniem nano-SiO₂ syntetyzowanej chemicznie. Badania kompozytów cementowych modyfikowanych nanokrzemionką potwierdziły jej przyspieszające działanie na hydratację C₃S i tworzenie się żelu C-S-H [4], modyfikację lepkości kompozytów [5] oraz poprawę szczelności matrycy cementowej [6], także w warunkach wysokiej temperatury [7].

Jak większość nanomateriałów nanokrzemionka ma skłonność do tworzenia skupisk zwanymi aglomeratami. Wydajność nanokrzemionki zależy od jej równomiernego rozmieszczenia w kompozycie, dlatego dezaglomeracja jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania kompozytu cementowego. Zastosowanie superplastifikatora jest często niewystarczające. Skuteczną, jednak kosztowną metodą aplikacji nano-SiO₂ jest połączenie sonikacji (ultradźwięki) z szybkim mieszaniem mechanicznym [8].

Nanokrzemionka jako produkt komercyjny dedykowany dla budownictwa produkowana jest w formie proszku powstałego ze zmielenia odpadowej stłuczki szklanej. Produkt ten zawiera cząsteczki nano-SiO₂ o średnicy 60-300 nm i jest przeznaczony jako domieszka do betonów wysokowartościowych, betonów architektonicznych i torkretu. Jako produkt przemysłowy nano-SiO₂ występuje również w posta-

containing up to 50% of the pure silica and designed for the self-compacting and pre-cast concretes.

The results of the tests of the cement mortars modified with various amounts of colloidal nanosilica are presented in the paper. This is nano-SiO₂ admixture in the form of the water suspension containing up to 50% of the pure nanosilica, produced in the industrial scale as the admixture for concretes and mortars. In order to evenly distribute the nano-admixture in water, sonication of the solution was used in addition to mechanical mixing.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Materials

Portland cement CEM I 42.5R, conforming to the requirements of PN-EN 197-1, was used for preparation of the cement mortars. The chemical composition of the cement is presented in Table 1. The standard sand 0÷2 mm conforming to the PN-EN 196-1 was also used. The mortars were modified with the admixture of commercial nanosilica, in the form of the alkaline water dispersion containing about 50% (by mass) of the colloidal silica. The dispersion of silica is stabilized with sodium, and the particles of the amorphous silica have negative surface charge. The silica particles have smooth, spherical shape and are present in the wide distribution of the size. The dispersion is a white fluid, with the viscosity (8 cP) and density (1.4 g/cm³) slightly higher than that of water. The diameters of nanosilica measured using SEM were from 40 to 160 nm. Four cement mortars were prepared with the content of nanosilica equal to 0%, 1%, 3% and 5% in relation to the cement mass. The samples of the mortars containing admixture of nano-SiO₂ were marked, respectively, M0, M1, M3 and M5. The proportions of the components are presented in Table 2. For all mortars the amount of cement was constant and the w/c ratio was 0.5. The water from the admixture was included into the composition of the mortars.

ci zawiesiny wodnej zawierającej maksymalnie do 50% czystej krzemionki i jest przeznaczony do betonów samozagęszczalnych oraz betonów stosowanych w prefabrykacji.

W pracy przedstawiono wyniki badań zapraw cementowych modyfikowanych różną ilością nanokrzymionki koloidalnej. Jest to domieszka nano-SiO₂ w postaci wodnej dyspersji zawierającej do 50% czystej nanokrzymionki, która produkowana jest na skalę przemysłową jako domieszka do betonów i zapraw cementowych. W celu równomiernego rozmieszczenia nanodomieszki w wodzie zastosowano oprócz mieszania mechanicznego sonikację roztworu.

2. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

2.1. Materiały

Do wykonania zapraw cementowych zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R spełniającym wymagania normy PN-EN 197-1, o składzie chemicznym podanym w tabeli 1, oraz piasek normowy frakcji 0÷2 mm zgodny z normą PN-EN 196-1. Zaprawy modyfikowano domieszką nanokrzymionki komercyjnej występującej w postaci alkalicznej wodnej dyspersji krzymionki koloidalnej, która stanowi około 50% wagowych części stałych. Dyspersja krzymionki jest stabilizowana sodem, a cząstki bezpostaciowej krzymionki mają ujemny ładunek powierzchniowy. Cząstki krzymionki, mają gładki, kulisty kształt i są obecne w szerokim rozkładzie wielkości cząstek. Fizyczny wygląd dyspersji to biały płyn o nieco wyższej lepkości niż woda (8 cP) i gęstości 1,4 g/cm³. Pomiarzone średnice nanokrzymionki z wykorzystaniem analizy SEM wynosiły od 40 nm do 160 nm. Wykonano cztery zaprawy cementowe o procentowej zawartości nanokrzymionki w stosunku do masy cementu wynoszącej odpowiednio: 0%, 1%, 3% i 5%. Próbkki zapraw z domieszką nano-SiO₂, w zależności od zawartości nanodomieszki, oznaczono symbolami M0, M1, M3 i M5. Proporcje składników zastosowanych do wykonania zapraw przedstawiono w tabeli 2. Dla wszystkich zapraw ilość cementu była stała, a wskaźnik w/c wynosił 0,5. W składzie zapraw uwzględniono wodę występującą w domieszce.

Table 1. Chemical properties of cement used in cement mortars

Tabela 1. Skład chemiczny cementu do wykonania zapraw cementowych

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	BaSO ₄	TiO ₂
CEM I 42.5 R	63.3	19.5	4.9	2.9	0.01	1.3	0.1	0.9	2.8	0.1	0.01

Table 2. Mix proportions of cement mortars
Tabela 2. Proporcje składników zapraw cementowych

Cement type	Nano-SiO ₂ content	Sand type	Proportion of C, W, S
CEM I 42.5 R	0, 1, 3, 5 (mass % of C)	Standard sand	C:W:S = 1:0.5:3
Note: C represents cement, W represents water, S represents sand			

Before introducing into the cement, the nano-SiO₂ admixture was mixed with the mixing water, using the mechanical stirrer. Simultaneously, the mixture of the mixing water and admixture was dispersed by sonication, in order to obtain the homogeneous suspension of SiO₂ in water. This mixture was added to the cement, using the standard mortar mixer. Times of mixing of the particular components of the mortars are presented in Table 3. The mortar without nano-SiO₂ was prepared according to PN-EN 196-1.

Przed wprowadzeniem nano-SiO₂ do cementu, domieszkę wymieszano z wodą zarobową z zastosowaniem mieszadła mechanicznego. Jednocześnie mieszanie wody zarobowej i domieszki poddano dyspersji przez sonikację w celu uzyskania jednorodnej zawiesiny SiO₂ w wodzie. Tak powstała mieszaninę dozowano do cementu, stosując normową mieszarkę do zapraw. Czasy mieszania poszczególnych składników zapraw przedstawiono w tabeli 3. Zaprawę bez domieszki nano-SiO₂ wykonano zgodnie z normą PN-EN 196-1.

Table 3. Main fabrication process of cement mortars with nano-SiO₂
Tabela 3. Sposób wykonania zapraw cementowych z nano-SiO₂

Feeding order	Technology		Moulding		Curing	
	Method	Time	Method	Size/mm	Conditions	Time
Water+nano-SiO ₂	Shear mixing (300 rot/min) and ultrasonication	10 min	Vibration	40 x 40 x 160 mm (mechanical test)	Air (20±2°C, at RH 95%)	2 days 28 days
Cement	Shear mixing (at low speed)	60 s				
–	Shear mixing (at fast speed)	30 s				
Sand	Shear mixing (at low speed)	30 s				
–	Shear mixing (at high speed)	60 s				

2.2. Methods of testing

The consistence of the mortars was determined using the flow table, according to PN-EN 1015-3. The consistence tests were carried out every 15 minutes within the period of 60 minutes from the finish of mixing the components. Before starting the next measurement, every mortar was mixed for 30 seconds in the mortar mixer at the low speed (140 rt/min).

The specimens for the mechanical tests were prepared in the form of the standard beams 4 x 4 x 16 cm. The specimens were demoulded after 24 hours of storing in the climate chamber at the temperature 20±2°C and relative humidity 95%.

2.2. Metody badań

Konsystencję zapraw oznaczono za pomocą stolika rozplywu zgodnie z normą PN-EN 1015-3. Badania konsystencji zapraw prowadzono co 15 minut przez okres 60 minut od momentu zakończenia mieszania składników. Przed rozpoczęciem kolejnego badania każdą zaprawę mieszano przez 30 sekund w mieszarce do zapraw z niską prędkością (140 obr/min.).

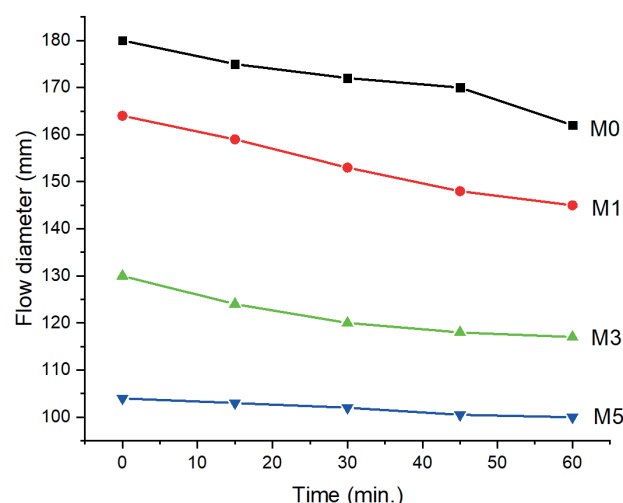
Próbki do badań właściwości mechanicznych zapraw uformowano w postaci standardowych belek prostopadłościennych o wymiarach 4 x 4 x 16 cm. Próbki rozformowano po 24 godzinach przecho- wywania w komorze klimatycznej w temperaturze

The way of preparing and curing of the specimens until testing is presented in the Table 3. The tests of the mechanical properties of the mortars were conducted after 2 and 28 days of curing. Six specimens were prepared for every mortar. Flexural and compressive strength was determined according to PN-EN 196-1.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Consistence of the mortars

The results of tests of the influence of nano-SiO₂ on the consistence of fresh mortars as a function of time are presented in Figure 1. A clear effect of the content of nano-SiO₂ admixture on the change of consistence of the mortars can be observed, both immediately after mixing of the components and within the next 60 minutes.



Introduction of nano-SiO₂ into the cement mortars have caused decreasing of the flow with growing admixture content. Nanosilica, like other nanomaterials, due to the high ratio of the specific area to the volume shows high water demand, and thus the content of the free water in the cement composite is decreasing with growing amount of nanosilica [9, 10].

The mortar with low content of nano-SiO₂ (M1) has demonstrated relatively good workability and stability of consistence within 60 minutes from mixing of the components. The mortars with high content of nano-SiO₂ (M3 and M5), however, have demonstrated significant fall of the consistence and, as a consequence, have poor workability. In the case of the mortar M5, the poor workability

20±2°C i wilgotności względnej 95%. Sposób formowania i przechowywania próbek zapraw do czasu badania właściwości mechanicznych przedstawiono w tabeli 3. Badania właściwości mechanicznych zapraw przeprowadzono po 2 i 28 dniach dojrzewania. Dla każdej z zapraw wykonano po 6 próbek i oznaczono wytrzymałość na zginanie i ściskanie zgodnie z normą PN-EN 196-1.

3. WYNIKI I DYKUSJA

3.1. Konsystencja zapraw

Wyniki badań wpływu nano-SiO₂ na konsystencję świeżych zapraw w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 1. Widoczny jest wyraźny wpływ ilości domieszki nano-SiO₂ na zmianę konsystencji badanych zapraw, zarówno bezpośrednio po wymieszaniu składników, jak i w badanym przedziale czasowym 60 minut.

Fig. 1. Flow diameter of the tested mortars as a function of time
 Rys. 1. Średnica rozprywu badanych zapraw w funkcji czasu

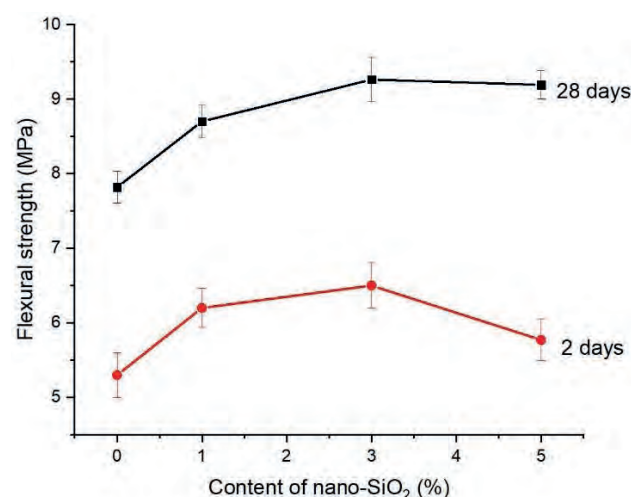
Wprowadzenie nano-SiO₂ do zapraw cementowych spowodowało zmniejszanie rozprywu wraz ze wzrostem zawartości domieszki. Nanokrzymionka, podobnie jak i inne nanomateriały, z uwagi na duży stosunek powierzchni właściwej do objętości, cechuje się dużą wodożądnością, przez co ilość wolnej wody w kompozycie cementowym zmniejsza się wraz ze wzrostem jej zawartości w kompozycie [9, 10].

Zaprawa z niską zawartością nano-SiO₂ (M1) wykazuje stosunkowo dobrą urabialność i dobrą stabilność konsystencji w przeciągu 60 minut od wymieszania składników. Domieszka 1% nanokrzymionki nie spowodowała spadku urabialności zaprawy w badanym czasie. Jednak zaprawy o dużej zawartości nano-SiO₂ (M3 i M5) wykazują znaczny spadek konsystencji, a co za tym idzie, wykazują słabą urabialność.

was observed immediately after mixing of the components. This leads to the extended time of compaction during preparation of the specimens. The testing of consistence reveals the necessity of the use of superplasticizers when higher amount of nano-SiO₂ (above 1% of the cement mass) is used, for obtaining the required workability of the mortars and limiting the excess of pores.

3.2. Flexural and compressive strength

The relation between the content of nano-SiO₂ and the flexural strength of the tested mortars are presented in Figure 2. The Table 4 presents the growth of the rate of flexural strength development after 2 and 28 days of curing. Analysis of the Figure 2 shows that the admixture of nano-SiO₂ caused an increase of the flexural strength. The maximum growths of strength were observed at 3% of nano-SiO₂ content in the mortar (M3). The higher increases of flexural strength were observed for the mortars after 2 days of curing (up to 24.5% for the mortar M3). The growth of 28-day flexural strength was lower and did not exceed 20% in relation to the standard mortar.



ścią. W przypadku zaprawy M5 już po wymieszaniu składników obserwowano bardzo niską urabialność, co skutkowało koniecznością zastosowania wydłużonego czasu zagęszczania zapraw przy formowaniu próbek do badań mechanicznych. Badania konsystencji pokazują bezwzględną konieczność stosowania superplastyfikatorów przy zastosowaniu większych ilości nano-SiO₂ (powyżej 1% m.c) w celu uzyskania wymaganej urabialności zapraw i ograniczenia nadmiernej ilości porów.

3.2. Wytrzymałość na zginanie i na ściskanie

Zależność pomiędzy zawartością nano-SiO₂ a wytrzymałością na zginanie badanych zapraw przedstawiono na rysunku 2. Tabela 4 przedstawia wzrost szybkości wytrzymałości na zginanie zapraw cementowych po 2 i 28 dniach dojrzewania. Z analizy rysunku 2 wynika, że domieszka nano-SiO₂ powoduje przyrost wytrzymałości zapraw na zginanie. Maksymalne przyrosty wytrzymałości obserwowano przy 3% zawartości nano-SiO₂ w zaprawie (M3). Większe przyrosty wytrzymałości na zginanie obserwowano dla zapraw po 2 dniach twardnienia (do 24,5% dla zaprawy M3). Przyrost 28-dniowej wytrzymałości na zginanie był niższy i nie przekroczył 20% w stosunku do zaprawy normowej.

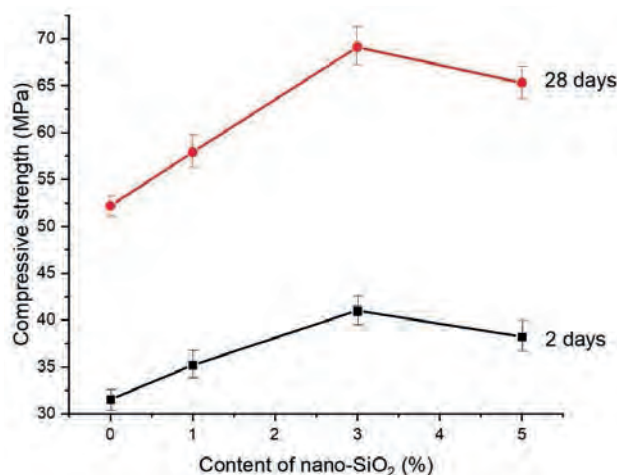
Fig. 2. Flexural strength of cement mortar with nano-SiO₂ at curing ages of 2 and 28 days

Rys. 2. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych z nano-SiO₂ po 2 i 28 dniach dojrzewania

Table 4. Increase of flexural and compressive strength of cement mortars with different content of nano-SiO₂
Tabela 4. Przyrost wytrzymałości na zginanie i ściskanie zapraw cementowych z różną zawartością nano-SiO₂

Curing age	Flexural strength (%)			Compressive strength (%)		
	With 1% of nano-SiO ₂	With 3% of nano-SiO ₂	With 5% of nano-SiO ₂	With 1% of nano-SiO ₂	With 3% of nano-SiO ₂	With 5% of nano-SiO ₂
2 days	17.0	24.5	8.9	11.6	30.1	21.2
28 days	11.3	18.4	17.5	11.0	32.5	25.2

The Figure 3 presents the relation between the compressive strength of the tested mortars and the content of nano-SiO₂.



Na rysunku 3 przedstawiono zależność pomiędzy zawartością nano-SiO₂ a wytrzymałością na ściskanie badanych zapraw.

Fig. 3. Compressive strength of cement mortar with nano-SiO₂ at curing ages of 2 and 28 days

Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych z nano-SiO₂ po 2 i 28 dniach dojrzewania

The analysis of the Figure 3 and the data from the Table 4 shows that the growths of the strength after both 2 and 28 days were similar for the mortars with the same content of nano-SiO₂. The maximum compressive strength was noted for the mortar with 3% of nano-SiO₂ (the mortar M3). At 3% content of nano-SiO₂, the more than 30% increase of the compressive strength after 2 and 28 days of curing was observed. The 3% content of the admixture of nanosilica seems to be an optimum, considering the improvement of the mechanical properties of the tested mortars. Due to the downfall of the workability of the mortar M3, however, the use of a superplasticizer is necessary. According to the number of the researches reported in the literature, the significant worsening of the physico-mechanical properties of the cement composites modified with nano-SiO₂ was observed most often at 5% content of nano-SiO₂ [11-14]. The large amount of nano-SiO₂ in cement composites creates significant problems in the even distribution of nanomaterial in the matrix, which results in the formation of agglomerates (Fig. 4). Nanoparticle agglomerates are the cause of local matrix weakening. This is the result of a greater demand for water for nanoparticles, which causes a local increase in the porosity of the capillary matrix in the vicinity of agglomerates [8, 15].

Z analizy rysunku 3 i danych z tabeli 4 wynika, że zarówno dla wczesnej wytrzymałości na ściskanie, jak i wytrzymałości 28-dniowej przyrosty wytrzymałości były zbliżone dla zapraw o tej samej zawartości nano-SiO₂. Maksymalną wytrzymałość na ściskanie zanotowano dla zapraw o zawartości 3% nano-SiO₂ (zaprawa M3). Przy zawartości 3% nano-SiO₂ obserwowano ponad 30% wzrost wytrzymałości na ściskanie po 2 i 28 dniach dojrzewania. Ilość 3% domieszki nanokrzemionki w zaprawie wydaje się wartością optymalną, biorąc pod uwagę poprawę właściwości mechanicznych badanych zapraw, jednak z uwagi na spadek urabialności zapraw M3 konieczne jest zastosowanie superplastifikatora. Jak wykazują stosunkowo liczne badania publikowane w literaturze, wyraźne pogorszenie cech fizyko mechanicznych kompozytów cementowych modyfikowanych nano-SiO₂ obserwowano najczęściej już przy 5% zawartości nano-SiO₂ w kompozycie [11-14]. Duża ilość nano-SiO₂ w kompozytach cementowych stwarza znaczące problemy w równomiernym rozmieszczeniu nanomateriału w matrycy, co skutkuje tworzeniem się aglomeratów (rys. 4). Aglomeraty nanocząstek są przyczyną lokalnego osłabienia matrycy. Jest to wynikiem większego zapotrzebowania na wodę nanocząstek, co powoduje lokalne zwiększenie porowatości kapilarnej matrycy w sąsiedztwie aglomeratów [8, 15].

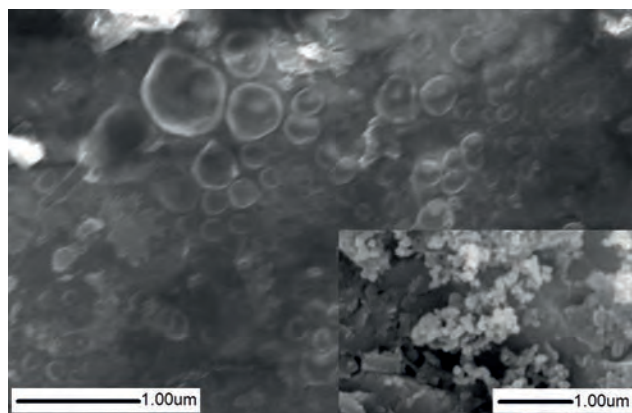


Fig. 4. SEM micrograph of the agglomeration of silica nanospheres [15]

Rys. 4. Mikrografia SEM aglomeratów nanosfer krzemionkowych [15]

4. CONCLUSIONS

On the basis of the performed tests and analyses, the following conclusions can be formulated:

- admixture of nanosilica improves the mechanical properties of the cement mortars. However, at the higher contents of the admixture in the composite, this effect can be diminished;
- nano-SiO₂ shows a practical potential as the admixture for the concrete pre-cast elements, because its use in the cement composites improves the early-age compressive and flexural strength;
- increasing content of nanosilica worsens the mortars workability, therefore at the higher contents of nano-SiO₂ a superplasticizer should be included into the composition of mortars and concretes;
- on the basis of the performed tests and the review of the literature, it can be accepted that the content of nano-SiO₂ in relation to the cement mass, in order to achievement of the desired properties of the composite, should not exceed 5%.

4. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań i analiz można sformułować następujące wnioski:

- domieszka nanokrzemionki poprawia właściwości mechaniczne zapraw cementowych, jednak przy większych ilościach domieszki w kompozycie efekt poprawy wytrzymałości mechanicznej może ulec zmniejszeniu;
- nano-SiO₂ wykazuje potencjał praktyczny jako domieszka stosowana przy produkcji prefabrykatów betonowych, gdyż jej zastosowanie w kompozycjach cementowych poprawia wczesną wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie;
- zwiększenie dodatku nanokrzemionki pogarsza urabialność zapraw, dlatego przy zastosowaniu większych ilości domieszki nano-SiO₂ należy w składzie zapraw i betonów uwzględnić zastosowanie superplastyfikatora;
- na podstawie wyników badań oraz przeglądu literatury można przyjąć, że zawartość nano-SiO₂ w stosunku do masy cementu w celu uzyskania pożądanych właściwości kompozytu nie powinna przekraczać 5% masy spoiwa.

REFERENCES

- [1] Sobolev K.: *Modern developments related to nanotechnology and nanoengineering of concrete*. Frontiers of Structural and Civil Engineering.10(2): 2016, 131–141, ISSN: 2095-2449.
- [2] Cendrowski K., Sikora P., Horszczaruk E., Mijowska E.: *Waste-free synthesis of silica nanospheres and silica nanocoatings from recycled ethanol-ammonium solution*, Chemical Papers, 71(4), 2017, 841-848, ISSN: 2585-7290.
- [3] Lim H.M. et al.: *Comparative Study of Various Preparation Methods of Colloidal Silica*. Engineering, 2, 2010, 998-1005. ISSN:1947-3931.
- [4] Ye Q., Zhang Z., Kong D., Chen R.: *Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume*. Construction and Building Materials, 21(3), 2007, 539–45, ISSN: 0950-0618.
- [5] Quercia G., Spiesz P., Hüskén G., Brouwers H.J.H.: *SCC modification by use of amorphous nano-silica*. Composites Part B, 81, 2015, 120-129, ISSN: 1359-8368.
- [6] Singh L.P., Karade S.R., Bhattacharyya S.K., Yousuf M.M., Ahalawat S.: *Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review*. Construction and Building Materials, 47, 2013, 1069–1077, ISSN: 0950-0618.
- [7] Horszczaruk E., Sikora P., Cendrowski K., Mijowska E.: *The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates*. Construction and Building Materials, 137, 2017, 420–431, ISSN: 0950-0618.

- [8] Johna E., Matscheib T., Stephan D.: *Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – A review*. Cement and Concrete Research. 113, 2018, 74-85, ISSN: 0008-8846.
- [9] Sikora P., Łukowski P., Cendrowski K., Horszczaruk E., Mijowska E.: *The Effect of Nanosilica on the Mechanical Properties of polymer-Cement Composites (PCC)*, Procedia Engineering, 108, 2015, 139-145, ISSN: 1877-7058.
- [10] Flores I., Pradoto R. G.K., Moini M., Kozhukhova M., Potapov V., Sobolev: *The effect of SiO₂ nanoparticles derived from hydrothermal solutions on the performance of Portland cement based materials*. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 11,4, 2017, 436-445, ISSN: 2095-2430.
- [11] Zhang P., Zhao Y-N., Li Q-F., Zhang T-H., Wang P., *Mechanical properties of fly ash concrete composite reinforced with nano-SiO₂ and steel fiber*, Current Science, 106, 11, 1529-1537 (2014).
- [12] Wang B.: *Influence of nano-SiO₂ on the strength of high performance concrete*, Materials Science Forum, 686, 2011, 432-437, ISSN: 1662-9752.
- [13] Li G.: *Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂*. Cement and Concrete Research. 34,2004, 1043–1049, ISSN: 0008-8846.
- [14] Horszczaruk E.: *Role of nanosilica in the formation of the properties of cement composites, state of the art*. Cement Wapno Beton, 6, 2018, 487-495, ISSN 1425-8129.
- [15] Horszczaruk E., Mijowska E., Cendrowski K., Mijowska S., Sikora P.: *Effect of incorporation route on dispersion of mesoporous silica nanospheres in cement mortar*. Construction and Building Materials 66, 2014, 418–421, ISSN: 0950-0618.

Acknowledgments:

The work was financed by the West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Faculty of Civil Engineering and Architecture

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

ANNA SKAWIŃSKA
The Łukasiewicz Research Network - Institute of Ceramics
and Building Materials, Division of Glass and Building Materials in Cracow
TOMASZ FOSZCZ
The Institute of Ceramics and Building Materials,
Department of Glass Technology in Cracow
e-mail: a.skawinska@icimb.pl

Manuscript submitted 2019.09.20 – revised 2019.10.04,
initially accepted for publication 2019.11.13, published in December 2019

STUDY OF RUBBER GRANULES IMPACT ON SELECTED MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT MORTARS

BADANIE WPŁYWU GRANULATU GUMOWEGO NA KSZTAŁTOWANIE WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ZAPRAW CEMENTOWYCH

DOI: 10.30540/sae-2019-019

Abstract

The ground rubber waste material from used vehicle tyres is used in road construction as well as in the cement industry. The use of granules in an amount of 5% causes a decrease in strength by about 25%. Replacement of 15% of cement by rubber waste is causing the reduction of strength by nearly 50%. The research of the microstructure of mortars with rubber granules indicates the proper hydration reaction. Observation under scanning electron microscope of mortar with ground rubber waste has shown presence of C-S-H phase and portlandite. The presence of additional, porous zones of contact between the granulate and cement paste was also found

Keywords: ground rubber waste, mortar, strength

Streszczenie

Rozdrobnione odpady gumowe z zużytych opon samochodowych znajdują zastosowanie w budownictwie drogowym, jak również przemyśle cementowym. Artykuł prezentuje wykorzystanie odpadów gumowych do modyfikacji zapraw cementowych. Zastosowanie granulatu w ilości 5% powoduje spadek wytrzymałości o około 20%. Zastąpienie cementu 15% odpadu gumowego przyczynia się do obniżenia wytrzymałości o blisko 50%. Badania mikrostruktury zapraw z granulem gumowym wskazują na prawidłowy przebieg procesu hydratacji. Pod skaningowym mikroskopem elektronowym obserwuje się włóknistą fazę C-S-H oraz portlandyt. Stwierdzono również obecność dodatkowych, porowatych stref kontaktu granulatu z zaczynem.

Słowa kluczowe: rozdrobniony granulak gumowy, zaprawa, wytrzymałość

1. INTRODUCTION

The storage and management of rubber waste is becoming a huge global problem. In Poland, the use of this type of recyclables is a major problem. Currently, there are two groups of rubber waste, in which the first group includes vehicle tyres (about 70%), the second group is industrial waste and conveyor belts (about 30%) [1, 2]. The Act of 14 December 2012 prohibits the disposal of tyres and their parts, excluding bicycle tyres and tyres with an external diameter greater than 140 cm [3]. Worn tyres are reconditioned, recycled or burned in cement plants. The European Union has imposed

1. WSTĘP

Ogromnym problemem światowym staje się składowanie i zagospodarowanie odpadów gumowych. W Polsce wykorzystanie tego typu surowców wtórnych stanowi duży problem. Wyróżnia się dwie grupy odpadów gumowych, pierwszą stanowią zużyte opony samochodowe (ok. 70%), drugą odpady przemysłowe i taśmy przenośnikowe (ok. 30%) [1, 2]. Ustawa z 14 grudnia 2012 r. zakazuje składowania na składowisku opon i ich części, z wyłączeniem opon rowerowych i opon o średnicy zewnętrznej większej niż 140 cm [3]. Zużyte opony poddawane są regeneracji, recyklingowi lub zostają spalane w cementowniach. Unia

extended liability on tyre manufacturers, which means that they are responsible for the recovery of tyres, which should be 75% and recycling 15%. The tyre recycling problem is a global issue with at least 7 million tonnes (Mg) of more waste every year. Today it is estimated that there are more than M 29 Mg of worn tyres globally with 23% recycled. They are most often used in road construction and power engineering.

One of the solutions for the management of rubber waste is to build it into a cement matrix [4-10]. Scientific research focused on the use of ground rubber waste as a substitute for aggregate in concrete mix. The authors of the research indicate an improvement in workability and high deformability of cement composites. They also emphasize that the compressive strength of concrete made of rubber granules is decreasing. Due to the use of this concrete, inter alia, in road construction as jersey concrete road barriers and in rail transport as railroad ties, compressive strength is a secondary parameter [4-13].

Ganijan and et al. [4] used rubber granules as a substitute for cement. On the basis of the research they found that the compressive strength of mortars depends on two factors: the size of rubber granules and its quantity. Replacement of cement with 5% rubber granules did not contribute to a significant decrease in compressive strength. Further increase in the amount of granules to 7.5% and 10% decreased the compressive strength after 28 days by 20% and 40%, respectively.

The paper presents the results of laboratory tests of cement mortars modified with different content of rubber granules. An attempt to use rubber granules as a substitute for cement was made with the use of this waste in building materials in mind. The scope of research covered testing of physical properties, mainly in terms of compressive strength. The paper presents the microstructure of mortars with rubber granules.

2. MATERIALS AND TEST METHODOLOGY

CEM I 42 R; CEM II/B-V 32.5 R; CEM III/A 32.5 N and CEM IV/B-V 32.5 N were used as a binder for cement mortars. Chemical composition of cements is presented in Table 1. Standardized sand was used as aggregate in line with PN-EN 196-1 standard. A constant water-cement ratio of 0.5 ($W/C = 0.5$) was maintained.

Europejska narzuciła na producentów opon rozszerzoną odpowiedzialność, oznacza to, że odpowiadają oni za odzysk opon, który powinien wynosić 75%, a recykling 15%. Co roku przybywa co najmniej 7 mln ton (Mg) odpadów. Obecnie szacuje się, że na świecie zużytych opon jest ponad 29 mln Mg, z których 23% ulega recyklingowi. Najczęściej wykorzystuje się je w budownictwie drogowym oraz w energetyce.

Jednym z rozwiązań zagospodarowania odpadów gumowych jest wbudowanie ich w matrycę cementową [4-10]. Badania skupiały się na wykorzystaniu rozdrobnionych odpadów gumowych jako zamiennika kruszywa w mieszance betonowej. Autorzy badań wskazują na poprawę urabialności oraz dużą odkształcalność kompozytów cementowych. Podkreślają również, że następuje spadek wytrzymałości na ściskanie betonów wykonanych z granulatem gumowym. Z uwagi na zastosowanie tego betonu, między innymi w budownictwie drogowym, jako bariery drogowe „Jersey”, oraz w transporcie kolejowym jako podkład kolejowy, wytrzymałość na ściskanie jest parametrem drugorzędnym [4-13].

Ganijan i inni [4] zastosowali granulaty gumowy jako zamiennik cementu. Stwierdzili, że wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych zależy od: wielkości granulatu gumowego oraz od jego ilości. Zastąpienie cementu 5% granulatu gumowego nie przyczyniło się do znacznego obniżenia wytrzymałości na ściskanie. Dalsze zwiększanie ilości granulatu do 7,5% i 10% spowodowało spadek wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach odpowiednio o 20% i 40%.

W artykule zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych zapraw cementowych modyfikowanych różną zawartością granulatu gumowego. Próba zastosowania granulatu gumowego jako zamiennika cementu została podjęta z uwagi na możliwość zagospodarowania tego odpadu w materiałach budowlanych. Zakresem badań zostały objęte badania właściwości fizycznych głównie pod kątem wytrzymałości na ściskanie. W artykule przedstawiono mikrostrukturę zapraw z granulatem gumowym.

2. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Do wykonania zapraw cementowych jako spoiwo wykorzystano cementy powszechnego użytku CEM I 42 R; CEM II/B-V 32,5 R; CEM III/A 32,5 N oraz CEM IV/B-V 32,5 N. Skład chemiczny cementów został przedstawiony w tabeli 1. Jako kruszywo zastosowano piasek normowy spełniający wymagania normy PN-EN 196-1. Zachowano stały stosunek wodno-cementowy, który wyniósł 0,5 ($W/C = 0,5$).

Table 1. Chemical composition of cement

Tabela 1. Skład chemiczny cementu

Properties	CEM I 42.5 R	CEM II/B-V 32.5 R	CEM III/A 32.5 N	CEM IV/B-V 32.5 N
Calcination losses	2.63±0.08	2.68±0.08	1.05±0.08	2.08±0.08
SiO ₂	19.65±0.2	30.21±0.2	32.57±0.2	30.08±0.2
Al ₂ O ₃	4.87±0.26	10.85±0.26	7.67±0.26	12.84±0.26
Fe ₂ O ₃	2.43±0.19	3.68±0.19	2.08±0.19	4.14±0.19
CaO	64.68±0.30	46.18±0.30	48.68±0.30	40.33±0.30
MgO	1.21±0.2	1.66±0.2	4.16±0.2	1.66±0.2
SO ₃	3.11±0.14	2.14±0.14	1.75±0.14	2.87±0.14
Na ₂ O	0.13±0.02	0.48±0.02	0.33±0.02	0.63±0.02
K ₂ O	0.73±0.04	1.17±0.04	0.53±0.04	1.42±0.04
Na ₂ O _{eqw.rozp.}	0.61	1.25	0.68	1.56

The modifying component was ground rubber waste from worn vehicle tyres. Rubber granules with 0-0.8 mm; 0.6-2.0 mm; 1-4 mm and 2.5-6 mm grain-size was used as a substitute for cement in amounts of 5% and 15% (mass percentage). The content of heavy metals in the rubber granules was examined and the results are presented in Table 2.

Składnikiem modyfikującym były rozdrobnione odpady gumowe pochodzące ze zużytych opon samochodowych. Granulat gumowy o frakcji 0-0,8 mm; 0,6-2,0 mm; 1-4 mm oraz 2,5-6 mm stosowany był jako zamiennik cementu w ilości 5% i 15% (procent masowy). W granulacie gumowym zbadano zawartość metali ciężkich, a wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Heavy metals	Heavy metal content in the extract of rubber granules 0-0.08 mm [mg/l] grain size
Beryllium	<0.00005
Vanadium	0.00014
Chromium	0.00006
Manganese	0.134
Cobalt	0.037
Nickel	0.00208
Copper	<0.00005
Zinc	3.04
Arsenic	<0.00005
Selenium	0.00828
Molybdenum	0.00096
Cadmium	<0.00005
Antimony	0.00068
Barium	0.0298
Thallium	<0.00005
Lead	0.00012
Mercury	<0.0007
pH	7.3

Table 2. Heavy metal content in the extract of rubber granules

Tabela 2. Zawartość metali ciężkich w wyciągu z granulatu gumowego

The basic components of tyres are (% mass/tyre): rubber 25%, silica 13%, soot 6%, sulphur 0.7%, zinc white 0.7%, activators 0.5%. The remaining part consists of metal cord, textile fibres and others, which constitute 53.5%.

The presence of heavy metals in tyres is related to the technological process. Zinc oxide ZnO is added directly to the production of the mix. The proportion of this oxide varies from 0.5% to 4% depending on the mix. The presence of antimony in water extract is associated with the addition of a flame retardant agent during the production of rubber, while cobalt salts are used as an adhesive. Other metals may come from bead wires, wire cords and polymerization catalysts.

Mixtures were prepared with cement replaced in the amount of 5% and 15% for each of the grain-size of rubber granules and for each cement.

The dosing of ingredients and the mixing time were in the following order. Cement and water are put in a stationary mixer. Rubber granules were added with the binder. After thirty seconds, standardized sand is placed where the mixing lasts thirty seconds. The mixing process is followed by manual homogenization and then restarting for 60 seconds.

An example of the mix composition is given in Table 3. Mortars with 5% and 15% of rubber granules of a grain-size of 0-0.8 mm; 0.6-2.0 mm; 1-4 mm and 2.5-6 mm were used for each type of cement. After the standardized 4x4x16 cm mortar bars were formed, the compressive strength tests were performed after 2, 7 and 28 days.

Podstawowymi komponentami opon są (% mas./oponę): kauczuk 25%, krzemionka 13%, sadza 6%, siarka 0,7%, biel cynkowa 0,7%, aktywatory 0,5%. Pozostałą część stanowi między innymi metalowy kord, włókna tekstylne i inne, które stanowią 53,5%.

Obecność metali ciężkich w oponach związana jest z procesem technologicznym. Bezpośrednio do produkcji mieszanki dodaje się tlenek cynku – ZnO. Udział tego tlenku waha się w zależności od mieszanki w granicach od 0,5% do 4%. Obecność antymonu w wyciągu wodnym wiąże się z dodatkiem podczas produkcji środka utrudniającego palenie się gumy, natomiast sole kobaltu stosowane są jako środek adhezyjny. Pozostałe metale mogą pochodzić z drutów z drutówki, stalowych nici opasających oraz katalizatorów polimeryzacji.

Dla każdej z frakcji granulatu gumowego i dla każdego cementu przygotowano mieszanki, w których cement zastępowany był w ilości 5% oraz 15%.

Dozowanie składników oraz czas mieszania odbywał się w następującej kolejności. W mieszarce stacjonarnej umieszcza się cement z wodą. Granulat gumowy wprowadzany był razem ze spoiwem. Po trzydziestu sekundach umieszcza się piasek normowy, gdzie mieszanie trwa trzydzieści sekund. Po zakończeniu procesu mieszania następuje ręczne homogenizowanie, a następnie ponowne uruchomienie na 60 sekund.

Przykładowy skład mieszanek przedstawiono w tabeli 3. Dla każdego rodzaju cementu wykonano zaprawy z 5% oraz 15 % granulatu gumowego o frakcji 0-0,8 mm; 0,6-2,0 mm; 1-4 mm oraz 2,5-6 mm. Po zaformowaniu beleczek normowych o wymiarach 4x4x16 cm wykonano badania wytrzymałości na ściskanie po 2, 7 i 28 dniach.

Table 3. Determination of mixes and their composition

Tabela 3. Oznaczenie mieszanek oraz ich skład

Composition [g]	Cement estimation		
	CEM I 42.5 R	CEM I 42.5 R + 5% rubber granules	CEM I 42.5 R + 15% rubber granules
Cement	450	427.5	382.5
Standardized sand	1350	1350	1350
Rubber waste	–	22.5	67.5
Water	225	225	225

Compressive strength tests of standardized mortar and mortar with rubber granules were performed according to PN-EN 196-1:2016-07. Heavy metal estimations were performed using the inductively coupled plasma mass spectrometry method (ICP-MS) in accordance with PN-EN ISO 17294-2:2016-11, from a previously prepared water extract prepared in accordance with PN-EN 12457-4:2006. The observations of the microstructure were made under the scanning electron microscope Thermo Scientific, Quattro S. The EDS chemical composition analysis was performed with the use of EDAX detector.

3. REVIEW OF FINDINGS

Table 4 shows the average compressive strength of mortars made from Portland cement CEM I 42.5 R with rubber granules after 2, 7 and 28 days.

Table 4. Compressive strength of CEM I 42.5 R mortars with rubber granules

Tabela 4. Wytrzymałość na ściskanie zapraw CEM I 42,5 R z granulatem gumowym

Test results	Compressive strength [MPa]		
	2 days	7 days	28 days
CEM I 42.5 R	28.1±0.4	46.4±1.0	58.4±0.8
CEM I 42.5 R 5% 0-0.08 mm	20.3±0.4	34.7±0.3	40.9±1.1
CEM I 42.5 R 5% 0.6-2 mm	21.6±0.1	36.8±0.8	43.5±0.9
CEM I 42.5 R 5% 1-4 mm	21.9±0.3	36.0±0.8	44.9±1.7
CEM I 42.5 R 5% 2.5-6 mm	22.4±0.4	36.8±0.8	43.6±1.8
CEM I 42.5 R 15% 0-0.08 mm	11.3±0.3	21.1±1.4	25.5±0.9
CEM I 42.5 R 15% 0.6-2 mm	12.8±0.2	23.1±0.6	28.2±0.5
CEM I 42.5 R 15% 1-4 mm	14.1±0.2	23.7±0.8	30.1±1.3
CEM I 42.5 R 15% 2.5-6 mm	14.4±0.2	24.3±1.5	29.4±1.9

Table 4 shows that the highest compressive strength of a mortar with 5% granules was obtained for fractions of 1-4 mm after 28 days and was 44.9 MPa. The lowest strength after 28 days was obtained for CEM I 42.5 R with the addition of 5% rubber granules of 0-0.08 mm grain-size. The compressive strength in this test was 40.9 MPa. The following compressive strength values of 43.5 MPa and 43.6 MPa were obtained for other mortars made of 5% rubber granules of 0.6-2 mm and 2.5-6 mm grain-size. For mortars with the addition of 15% rubber granules, a lower compressive strength by 50% is observed in comparison with the standardized mortar after 2, 7 and 28 days.

Table 5 shows the compressive strength of mortars based on CEM II/B-V 32.5 R with rubber granules.

Badania wytrzymałości na ściskanie zaprawy normowej oraz z granulatem gumowym wykonano według PN-EN 196-1:2016-07. Oznaczenia metali ciężkich wykonano przy pomocy metody spektrometrii mas w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-MS) zgodnie z normą PN-EN ISO 17294-2:2016-11, z uprzednio przygotowanego wyciągu wodnego wykonanego zgodnie z normą PN-EN 12457-4:2006. Obserwacje mikrostruktury wykonano pod elektronowym mikroskopem skaningowym Thermo Scientific, model Quattro S. Analizę składu chemicznego EDS wykonano z zastosowaniem detektora firmy EDAX

3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

W tabeli 4 została przedstawiona średnia wytrzymałość na ściskanie zapraw wykonanych z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R z granulatem gumowym po 2, 7 i 28 dniach.

Z tabeli 4 wynika, że największą wytrzymałość na ściskanie zaprawy z dodatkiem 5% granulatu otrzymano dla frakcji 1-4 mm po 28 dniach, która wyniosła 44,9 MPa. Najniższą wytrzymałość po 28 dniach uzyskano dla CEM I 42,5 R z dodatkiem 5% granulatu gumowego o frakcji 0-0,08 mm. Wytrzymałość na ściskanie dla tej próby wyniosła 40,9 MPa. Dla pozostałych zapraw z 5% granulatu gumowego o frakcji 0,6-2 mm i 2,5-6 mm uzyskano następujące wytrzymałości na ściskanie: 43,5 MPa i 43,6 MPa. Dla zapraw z dodatkiem 15% granulatu gumowego obserwuje się o 50% niższą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu z zaprawą normową po 2, 7 i 28 dniach.

W tabeli 5 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie zapraw na bazie CEM II/B-V 32,5 R z granulatem gumowym.

Table 5. Compressive strength of CEM II/B-V32.5 R mortars with rubber granules

Tabela 5. Wytrzymałość na ściskanie zapraw CEM II/B-V32,5 R z granulatem gumowym

Test results	Compressive strength [MPa]		
	2 days	7 days	28 days
CEM II/B-V 32.5 R	17.5±0.3	30.9±0.5	42.1±0.7
CEM II/B-V 32.5 R 5% 0-0.08 mm	12.9±0.2	23.2±0.3	32.0±0.4
CEM II/B-V 32.5 R 5% 0.6-2 mm	13.5±0.1	23.6±0.3	32.7±0.6
CEM II/B-V 32.5 R 5% 1-4 mm	13.3±0.2	23.8±0.6	33.2±1.0
CEM II/B-V 32.5 R 5% 2.5-6 mm	13.4±0.1	23.4±0.5	33.1±0.7
CEM II/B-V 32.5 R 15% 0-0.08 mm	6.4±0.1	12.4±0.3	16.3±0.2
CEM II/B-V 32.5 R 15% 0.6-2 mm	8.2±0.1	15.8±0.3	21.2±0.5
CEM II/B-V 32.5 R 15% 1-4 mm	8.3±0.2	16.5±0.5	23.3±1.0
CEM II/B-V 32.5 R 15% 2.5-6 mm	8.7±0.1	16.5±0.8	23.4±1.8

Table 5 shows that the compressive strength of mortars with the addition of 5% rubber granulates of 0-0.8 mm; 0.6-2 mm; 1-4 mm and 2.5-6 mm grain-size is at a similar level. The compressive strength after 28 days for these mortars was 32.0 MPa, 32.7 MPa, 33.2 MPa and 33.1 MPa. Similarly to CEM I 42.5 R mortar, the lowest strength was obtained for mortars in which cement was replaced with 15% of rubber granules. The decrease in compressive strength was lower by 25.8 MPa (0-0.08 mm), 20.9 MPa (0.6-2), 18.8 MPa (1-4 mm) and 18.7 MPa (2.5-6 mm) for the CEM II/B-V 32.5 R mortar after 28 days.

Z tabeli 5 wynika, że wytrzymałość na ściskanie zapraw z dodatkiem 5% granulatu gumowego o frakcji 0-0,8 mm; 0,6-2 mm; 1-4 mm i 2,5-6 mm jest na podobnym poziomie. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dla tych zapraw była następująca: 32,0 MPa, 32,7 MPa, 33,2 MPa i 33,1 MPa. Podobnie jak dla zaprawy CEM I 42,5 R najniższe wytrzymałości uzyskano dla zapraw, w których cement zastąpiono 15% granulatu gumowego. Spadek wytrzymałości na ściskanie był niższy o 25,8 MPa (0-0,08 mm), 20,9 MPa (0,6-2 mm), 18,8 MPa (1-4 mm) i 18,7 MPa (2,5-6 mm) w odniesieniu do zaprawy CEM II/B-V 32,5 R po 28 dniach.

Table 6. Compressive strength of CEM III/A 32.5 N mortars with rubber granules

Tabela 6. Wytrzymałość na ściskanie zapraw CEM III/A 32,5 N z granulatem gumowym

Test results	Compressive strength [MPa]		
	2 days	7 days	28 days
CEM III/A 32.5 N	9.8±0.1	21.5±0.6	33.7±0.7
CEM III/A 32.5 N 5% 0-0.08 mm	7.8±0.2	15.3±0.4	25.7±0.8
CEM III/A 32.5 N 5% 0.6-2 mm	7.5±0.1	16.1±0.4	26.5±0.8
CEM III/A 32.5 N 5% 1-4 mm	8.4±0.2	17.1±0.4	26.6±0.9
CEM III/A 32.5 N 5% 2.5-6 mm	8.3±0.1	17.1±0.7	27.2±1.4
CEM III/A 32.5 N 15% 0-0.08 mm	4.0±0.1	8.7±0.2	12.6±0.3
CEM III/A 32.5 N 15% 0.6-2 mm	4.1±0.1	9.6±0.2	16.5±0.5
CEM III/A 32.5 N 15% 1-4 mm	4.6±0.1	11.4±0.7	18.1±0.8
CEM III/A 32.5 N 15% 2.5-6 mm	4.6±0.1	10.9±0.6	18.5±0.9

For the mortar based on CEM III/A 32.5 N cement a similar relationship can be observed as for the mortar based on CEM I 42.5 R and CEM II/B-V 32.5 R. The lowest strength is achieved for tests with the

Dla zaprawy wykonanej na cemencie CEM III/A 32,5 N obserwuje się podobną zależność jak zapraw na bazie CEM I 42,5 R i CEM II/B-V 32,5 R. Najniższą wytrzymałość uzyskuje się dla prób z dodat-

addition of 15% rubber granules. The compressive strength of the standard mortar was 33.7 MPa after 28 days. For mortar with the addition of 5% rubber granules of 0-0.8 mm, 0.6-2 mm, 1-4 mm and 2.5-6 mm grain-size, the compressive strength after 28 days was as follows: 25.7 MPa, 26.5 MPa, 26.6 MPa and 27.2 MPa. For mortars with 15% rubber granules, the compressive strength was as follows: 12.6 MPa for 0-0.08 mm grain-size, 16.5 MPa for 0.6-2.0 mm grain-size, 18.1 MPa for 1-4 mm grain-size and 18.5 MPa for 2.5-6 mm grain-size.

kiem 15% granulatu gumowego. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy wzorcowej wyniosła 33,7 MPa po 28 dniach. Dla zaprawy z dodatkiem 5% granulatu gumowego o frakcji 0-0,8 mm; 0,6-2 mm; 1-4 mm i 2,5-6 mm wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach była następująca: 25,7 MPa, 26,5 MPa, 26,6 MPa i 27,2 MPa. Dla zapraw z 15% granulatu gumowego wytrzymałość na ściskanie była następująca: 12,6 MPa dla frakcji 0-0,08 mm, 16,5 MPa dla frakcji 0,6-2,0 mm, 18,1 MPa dla frakcji 1-4 mm i 18,5 MPa dla frakcji 2,5-6 mm.

Table 7. Compressive strength of CEM IV/B(V) 32.5 N mortars with rubber granules

Tabela 7. Wytrzymałość na ściskanie zapraw CEM IV/B(V) 32,5 N z granulatem gumowym

Test results	Compressive strength [MPa]		
	2 days	7 days	28 days
CEM IV/B-V 32.5 N	18.2±0.3	28.4±0.6	40.3±0.5
CEM IV/B(V) 32.5 N 5% 0-0.08 mm	14.4±0.5	21.1±0.4	31.1±0.5
CEM IV/B(V) 32.5 N 5% 0.6-2 mm	14.2±0.3	22.3±0.5	32.2±0.8
CEM IV/B(V) 32.5 N 5% 1-4 mm	14.3±0.5	24.0±0.5	31.6±1.0
CEM IV/B(V) 32.5 N 5% 2.5-6 mm	14.0±0.4	23.4±0.8	32.2±0.7
CEM IV/B(V) 32.5 N 15% 0-0.08 mm	8.2±0.2	13.6±0.3	18.1±0.5
CEM IV/B(V) 32.5 N 15% 0.6-2 mm	9.1±0.1	14.6±0.5	20.5±0.6
CEM IV/B(V) 32.5 N 15% 1-4 mm	9.5±0.5	15.3±1.1	21.1±0.5
CEM IV/B(V) 32.5 N 15% 2.5-6 mm	9.6±0.3	15.2±0.5	22.4±0.6

The strength of the mortar based on CEM IV/B(V) 32.5 N cement after 2, 7 and 28 days was 18.2 MPa, 28.4 MPa and 40.3 MPa. The highest strength after 28 days was obtained for CEM IV/B(V) 32.5 N 5% 0.6-2 mm and was 32.2 MPa. The same value was obtained for CEM IV/B(V) 32.5 N 2.5-6.0. The lowest strength after 28 days was obtained for CEM IV/B(V) 32.5 N 5% 0-0.8 mm mortar (31.1 MPa). After 28 days the compressive strength of the tests with 15% rubber granules was lower than that of the reference mortar strength by 22.2 MPa (CEM IV/B(V) 32.5 N 15% 0-0.8 mm), 19.8 MPa (CEM IV/B(V) 32.5 N 15% 0.6-2 mm), 19.2 MPa (CEM IV/B(V) 32.5 N 5% 1-4 mm) and 17.9 MPa.

An example of a microstructure with X-ray microanalysis of cement mortar (CEM II B-V 32.5 R) with rubber granules of 1.0-4.0 mm grain-size is shown in Figures 1a-1c.

Wytrzymałość zaprawy na bazie cementu CEM IV/B(V) 32,5 N po 2, 7 i 28 dniach była następująca: 18,2 MPa, 28,4 MPa i 40,3 MPa. Najwyższą wytrzymałość po 28 dniach uzyskano dla próby CEM IV/B(V) 32,5 N 5% 0,6-2 mm, która wyniosła 32,2 MPa. Tę samą wartość uzyskano dla zaprawy CEM IV/B(V) 32,5 N 2,5-6,0. Najniższą wytrzymałość po 28 dniach otrzymano dla zaprawy CEM IV/B(V) 32,5 N 5% 0-0,8 mm (31,1 MPa). Wytrzymałość na ściskanie dla prób z dodatkiem 15% granulatu gumowego po 28 dniach była niższa od wytrzymałości zaprawy odniesienia o 22,2 MPa (CEM IV/B(V) 32,5 N 15% 0-0,8 mm), 19,8 MPa (CEM IV/B(V) 32,5 N 15% 0,6-2 mm), 19,2 MPa (CEM IV/B(V) 32,5 N 5% 1-4 mm) i 17,9 MPa.

Przykładowa mikrostruktura wraz z mikroanalizą rentgenowską zaprawy cementowej (CEM II B-V 32,5 R) z granulatem gumowym o frakcji 1,0-4,0 mm została przedstawiona na rysunkach 1a-1c.

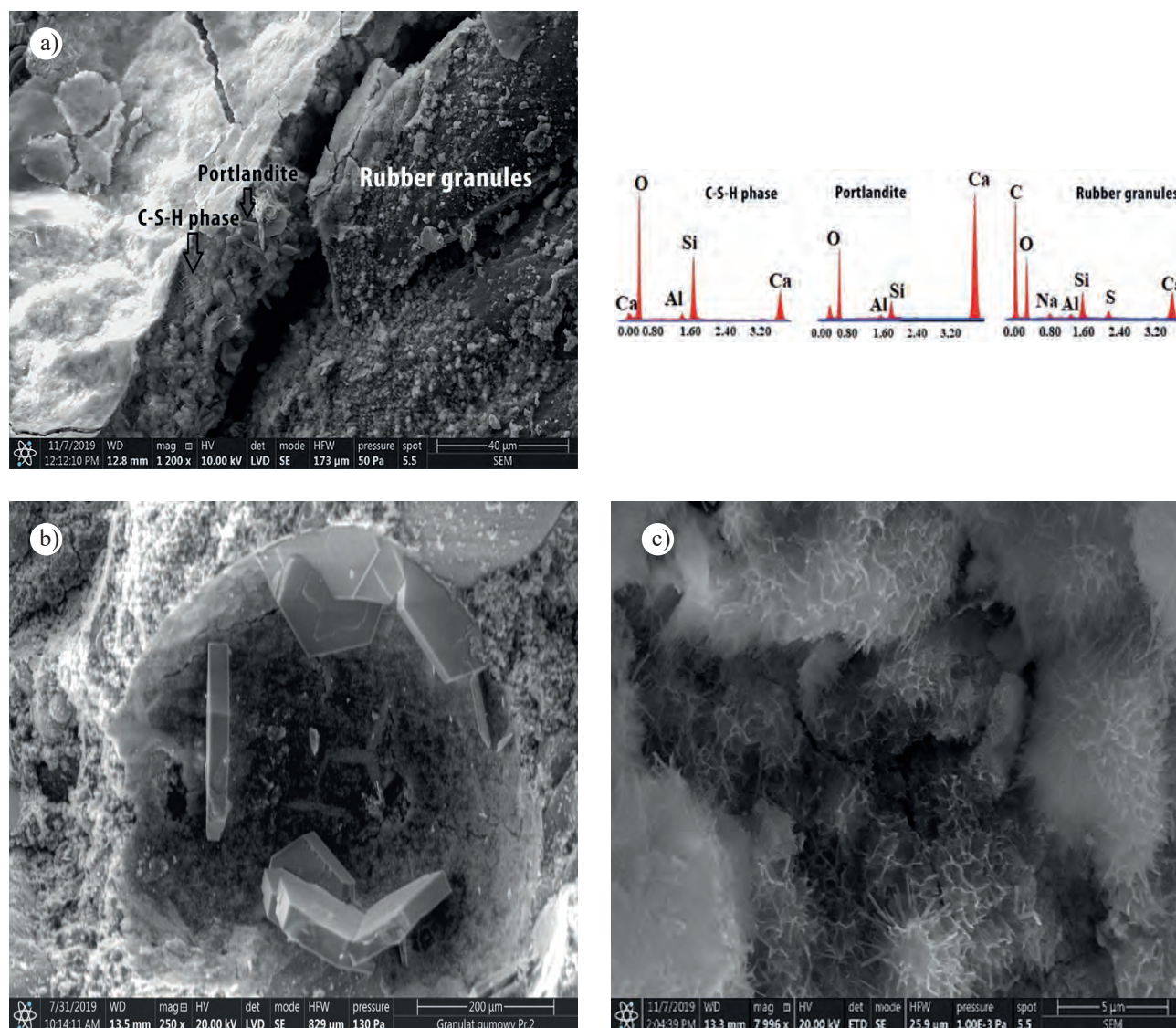


Fig. 1. Microstructure of cement mortars with rubber granules: a) contact zone cement paste-rubber granules, b) phase C-S-H, c) portlandite

Rys. 1. Mikrostruktura zapraw cementowych z granulatem gumowym: a) strefa kontaktowa zaczyn-granulat gumowy, b) faza C-S-H, c) portlandyt

Figure 1 shows the mortar microstructure with rubber granules. In the cement paste-rubber granules contact layer (Fig. 1a) higher amounts of portlandite are observed (Fig. 1b). The presence of this phase is associated with a locally higher W/C ratio. The addition of rubber granules to the cement mortar does not affect the formation of C-S-H phase (Fig. 1c). This phase is characterized by a fibrous structure in the tested samples.

4. SUMMARY

The use of rubber granules as a substitute for cement provides interesting results. Taking into account the environmental aspect, the granules are disposable.

Na rysunku 1 przedstawiono mikrostrukturę zaprawy z dodatkiem granulatu gumowego. W warstwie kontaktowej zaczyn-granulat gumowy (rys. 1a) obserwuje się większe ilości portlandytu (rys. 1b). Obecność tej fazy związana jest z lokalnie większym współczynnikiem W/C. Dodatek granulatu gumowego do zaprawy cementowej nie wpływa na powstawanie fazy C-S-H (rys. 1c). Faza ta charakteryzuje się w badanych próbkach strukturą włóknistą.

4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie granulatu gumowego jako zamiennika cementu daje interesujące wyniki. Biorąc pod uwagę aspekt ekologiczny, zastosowanie granulatu

The use of 5% rubber granules in mortars resulted in a reduction of strength by about 20% in relation to the reference mortar for all tested cements. Obtained results of cement mortar compressive strength tests are lower than those given in the literature. Ganjian et al. [4] report that the use of ground tyres as a 5% replacement for cement results in a 5% reduction in strength.

Preliminary tests were limited to two levels of 5% and 15% of rubber granules addition as a substitute for cement. The use of 15% rubber waste in all mortars results in a 50% reduction of strength in all mortars, which disqualifies them from further testing. The mortar microstructure tests with the addition of rubber granules of 1-4 mm grain-size showed that the use of rubber granules does not disturb the formation of the C-S-H phase, which is characterized by a fibrous structure. Increased portlandite content occurs in the cement paste-rubber granules contact layer.

daje możliwość jego utylizacji. Użycie 5% granulatu gumowego w zaprawach spowodowało obniżenie wytrzymałości o około 20% w stosunku do zaprawy odniesienia dla wszystkich badanych cementów. Otrzymane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych są niższe niż podaje literatura. Ganjian i inni [4] podają, że zastosowanie rozdrobnionych opon jako zamiennika cementu w ilości 5% powoduje spadek wytrzymałości o 5%.

Badania wstępne ograniczyły się do dwóch poziomów 5% i 15% dodatku granulatu gumowego jako zamiennika cementu. Zastosowanie 15% odpadu gumowego powoduje we wszystkich zaprawach spadek wytrzymałości o 50%, co dyskwalifikuje je w dalszych etapach badań. Badania mikrostruktury zaprawy z dodatkiem granulatu gumowego o frakcji 1-4 mm wykazały, że zastosowanie granulatu gumowego nie zaburza powstawania fazy C-S-H, która charakteryzuje się strukturą włóknistą. Zwiększona zawartość portlandytu występuje w warstwie kontaktowej zaczyn-granulat gumowy.

REFERENCES

- [1] Horodecka R., Kalabińska M., Piłat J., Radziszewski P., Sybilski D.: *Wykorzystanie zużytych opon samochodowych w budownictwie drogowym*. IBDiM, Warszawa, 2002.
- [2] Sybilski D.: *Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie drogowym*, Przegląd Budowlany, 80(5), 2009, 37-44.
- [3] Journal of Laws of 2013, item 21 Act of 14 December 2012 on waste.
- [4] Ganjian E., Khorami M. and Maghsoudi A.A.: *Scrap- Tire-Rubber Replacement For aggregate and Filler in Concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 5, 2009, 1828-1836.
- [5] Batayneh M.K., Iqbal M. and Ibrahim A.: *Promoting the Use of Crumb Rubber Concrete in Developing countries*, Waste Management, Vol. 28, No. 11, 2008, pp. 2171- 2176.
- [6] Topcu I.B. and Demir A.: *Durability of Rubberized Mortar and Concrete*, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 173-178. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:2(173).
- [7] Hernandez-Olivares F. and Barluenga G.: *Fire Performance of Recycled Rubber-Filled High-Strength Concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 1, 2004, pp. 109-117. doi:10.1016/S0008-8846(03)00253-9.
- [8] Pierce C.E. and Blackwell M.C.: *Potential of Scrap Tire Rubber as Lightweight Aggregate Inflowable Fill*, Waste Management, Vol. 23, No. 3, 2003, pp. 197-208.
- [9] Sgobba S., Marano G.C., Borsa M. and Molfetta M.: *Use of Rubber Particles from Recycled Tires as Concrete Aggregate for Engineering Applications*, Coventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Centre for By-Products Utilization, 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, 28-30 June 2010, 11 p.
- [10] Boudaoud Z., Beddar M.: *Effects of Recycled tires rubber aggregates on the characteristic of cement concrete*, Open Journal of civil Engineering, 2012, 2, 193-197.
- [11] Benazzouk A., Mezreb K., Doyen G., Goullieux A. and Quéneudec M.: *Effect of Rubber Aggregates on the Physico-Mechanical Behavior of Cement-Rubber Composites-Influence of the Alveolar Texture of Rubber Aggregates*, Cement and Concrete Composites, Vol. 25, No. 7, 2003, pp. 711-720. doi:10.1016/S0958-9465(02)00067-7.
- [12] Benazzouk A., Douzane O. and Quéneudec M.: *Transport of Fluids in Cement-Rubber Composites*, Cement and Concrete Composites, Vol. 26, No. 1, 2004, pp. 21-29. doi:10.1016/S0958-9465(02)00119-1.
- [13] Topçu U. B.: *The Properties of Rubberized Concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 2, 1995, pp. 304-310. doi:10.1016/0008-8846(95)00014-3.

Acknowledgments:

This work was supported by Ministry of Science and Higher Education, Grant No. 3NS20K18/3NS17K19 – The Łukasiewicz Research Network- Institute of Ceramics and Building Materials, Division of Glass and Building Materials in Cracow

Podziękowania:

Praca finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, praca statutowa nr 3NS20K18/3NS17K19 – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie



MAŁGORZATA LINEK
Kielce University of Technology
e-mail: linekm@tu.kielce.pl

MARIUSZ WESOŁOWSKI
Air Force Institute of Technology
e-mail: mariusz.wesolowski@itwl.pl

Manuscript submitted 2019.10.22 – revised 2019.11.07,
initially accepted for publication 2019.12.06, published in December 2019

SELECTED ASPECTS OF EVALUATING THE TECHNICAL CONDITION OF CONCRETE AIRPORT PAVEMENTS IN TERMS OF SERVICE LIFE

WYBRANE ASPEKTY OCENY STANU TECHNICZNEGO BETONOWYCH NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH W UJĘCIU TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ

DOI: 10.30540/sae-2019-020

Abstract

The paper presents the essence of airport pavements' durability in terms of its condition's evaluation. It features a discussion of selected research methods for the most important pavement parameters. It was proposed to expand the existing pavement condition evaluation process with selected verification methods. The use of geo-radar measurements in connection with the specification of the pavement concrete's durability and concrete pavement's internal structure analysis seems to be a necessary element supplementing the currently used evaluation procedure.

Keywords: concrete pavement durability, airport pavements, pavement technical condition

Streszczenie

W artykule przedstawiono istotę trwałości nawierzchni lotniskowych w kontekście oceny stanu nawierzchni. W ramach rozważań omówiono wybrane metody badawcze dla najważniejszych parametrów nawierzchniowych. Zaproponowano rozszerzenie istniejącego procesu oceny stanu nawierzchni o wybrane metody weryfikacyjne. Wykorzystanie pomiarów georadarowych w powiązaniu z określeniem wytrzymałości betonu w nawierzchni i analizą struktury wewnętrznej kompozytu betonowego wydaje się nieodzownym elementem uzupełniającym stosowaną obecnie procedurę oceny.

Słowa kluczowe: trwałość nawierzchni betonowych, nawierzchnie lotniskowe, stan techniczny nawierzchni

1. INTRODUCTION

Atmospheric conditions acting on airport pavements [1], especially in daily and annual cycles [2], contribute to the increase in concrete slab stress [3]. This phenomenon is especially observed in winter, because the concrete is exposed to humidity, frost and chemical agents used for winter pavement maintenance (urea, sodium and potassium acetate, sodium and potassium formate as well as ethylene and propylene glycols) and can be more easily damaged. The requirements concerning agents used for preventing icing and thawing of airport pavements' functional elements are presented in the

1. WPROWADZENIE

Działające na nawierzchnie lotniskowe warunki atmosferyczne [1], szczególnie w cyklach dobowych i rocznych [2], przyczyniają się do zwiększenia wytrzymałości płyt betonowych [3]. Zjawisko to obserwuje się szczególnie w warunkach zimowych, ponieważ beton narażony na oddziaływanie wilgoci, mrozu i środków chemicznych do zimowego utrzymania nawierzchni, w tym szczególnie moczników, octanów sodu i potasu, mrówczanów sodu i potasu oraz glikoli etylenowych i propylenowych łatwiej może ulegać uszkodzeniom. Wymagania dotyczące środków stosowanych do zapobiegania powstawania oblodzenia i odladzania ele-

NO-17-A205:2017 standard [4]. As for the essence of airport pavements' winter maintenance, the topic was discussed in literature [2, 5]. The negative impact on airport pavements is also observed as result of aircraft exploitation and moving specialist vehicles. In many cases, the traffic slab can feature small quantities of exploitation liquids deriving from fuel, hydraulic, oil or pneumatic systems the on-going exploitation of which can contribute to the reduction of the pavement's durability. A special type of impact on concrete airport pavements are coerced thermal loads caused by the emission of hot exhaust fume streams from the nozzles of planes taking off, especially of military aircrafts [6]. Coerced thermal loads are repeated, massless coercions of high kinetic energy and high temperature gas streams on the pavement. These loads can contribute to some extent to the peeling of the pavement's surface layer. The damage can especially be observed in the strips of concrete slabs adjacent to the runway axis, at its end sections. Due to the complex nature of the pavement loads, it is necessary to ensure the exploitative durability of airport structures during each stage of use.

2. ASPECTS CONCERNING AIRPORT PAVEMENTS' DURABILITY

One of the most important factors guaranteeing safety during the use of concrete airport pavement is the knowledge of the actual technical condition of the exploited structural layout. The essence of airport pavements' diagnostics is discussed in detail, among others, in papers [2, 7-12]. The most general division of diagnostic methods covers the highlighting of three basic groups – Figure 1, as part of which a cross-sectional analysis is conducted – Figure 2.

mentów funkcjonalnych nawierzchni lotniskowych przedstawione są w normie NO-17-A205:2017 [4]. A istotę zimowego utrzymania nawierzchni lotniskowych omówiono m.in. w [2, 5]. Negatywne oddziaływanie obserwowane jest również na skutek eksploatacji statków powietrznych i pojazdów specjalistycznych poruszających się po nawierzchniach lotniskowych. W wielu przypadkach na płycie jezdnej mogą pojawić się niewielkie ilości cieczy eksploatacyjnych pochodzących z instalacji paliwowych, hydraulicznych, olejowych czy pneumatycznych, których trwająca w czasie eksploatacja może przyczynić się do obniżenia trwałości nawierzchni. Szczególnym rodzajem oddziaływań na betonowe nawierzchnie lotniskowe są wymuszone obciążenia termiczne powodowane przez emisję gorących strumieni gazów spalinowych z dysz startujących samolotów, zwłaszcza wojskowych statków powietrznych [6]. Wymuszone obciążenia termiczne są wielokrotnie powtarzalnymi bez masowymi wymuszeniami strumienia gazów o dużej energii kinetycznej i wysokiej temperaturze na nawierzchnię. Obciążenia te w pewnym stopniu mogą przyczynić się do powstania w przypowierzchniowej warstwie nawierzchni złuszczeń. Uszkodzenia te można zaobserwować szczególnie w pasmach płyt betonowych przylegających do osi drogi startowej na jej końcowych odcinkach, tzw. wybiegach. Z uwagi na złożony, przedstawiony charakter obciążenia nawierzchni należy zapewnić trwałość eksploatacyjną konstrukcji lotniskowej na każdym etapie użytkowania.

2. ZAGADNIENIA TRWAŁOŚCI UŻYTKOWEJ NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH

Jednym z ważniejszych czynników gwarantujących bezpieczeństwo w trakcie użytkowania betonowych nawierzchni lotniskowych jest znajomość rzeczywistego stanu technicznego eksploatowanego układu konstrukcyjnego. Istotę diagnostyki nawierzchni lotniskowych szczegółowo omówiono m.in. w pracach [2, 7-12]. Najogólniejszy podział metod diagnostycznych obejmuje wyróżnienie trzech podstawowych grup – rysunek 1, w ramach których dokonywana jest analiza przekrojowa – rysunek 2.

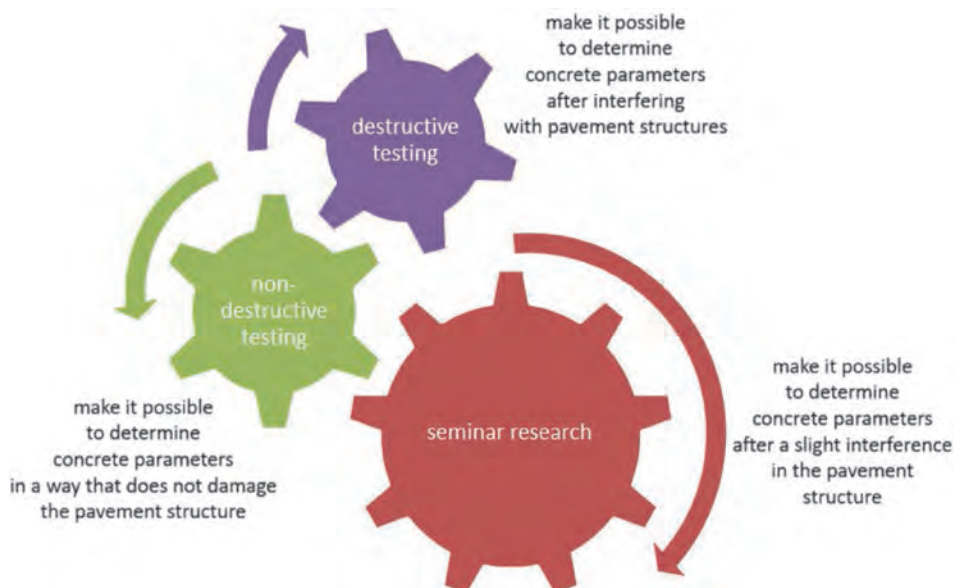


Fig. 1. Division of the diagnostic methods applied to concrete airport pavements

Rys. 1. Podział stosowanych metod diagnostycznych na betonowych nawierzchniach lotniskowych

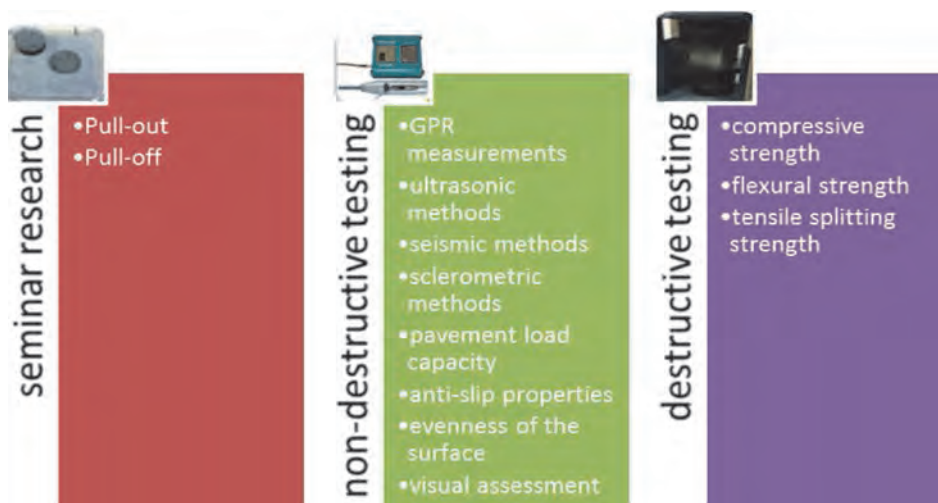


Fig. 2. Classification of the pavement condition's evaluation methods

Rys. 2. Klasyfikacja metod oceny stanu nawierzchni

The evaluation of the current condition of an concrete airport pavement and possible qualification of the pavement for an adequate type of repair is done by using the damage index (Z_B or Z_N), technical wear index (D) and repair index (N). The pavement parameters' qualification intervals for evaluating the service condition are presented in Table 1, in which class I pavements have a very good service condition, class II – good condition, class III – average condition (protective treatment is required), class IV – mediocre condition (repairs or overhauls are required) and class V – bad condition, requiring a major overhaul of the pavement. In cases deviating from the intervals specified in Table 1, it is necessary to designate

W celu oceny bieżącej stanu betonowej nawierzchni lotniskowej i ewentualnej kwalifikacji do odpowiedniego rodzaju naprawy wykorzystywany jest wskaźnik uszkodzeń (Z_B lub Z_N), wskaźnik zużycia technicznego (D) oraz wskaźnik napraw (N). Przedziały kwalifikacyjne parametrów nawierzchni do oceny stanu użytkowego zestawiono w tabeli 1, w której klasie I nawierzchni odpowiada bardzo dobry stan użytkowy, klasie II stan dobry, klasie III stan średni (konieczne są zabiegi ochronne), klasie IV odpowiada stan mierny (konieczna jest naprawa lub remont), a klasie V odpowiada stan zły i konieczne jest wykonanie remontu kapitalnego nawierzchni. W przypadkach odbiegających od przedziałów za-

the general evaluation index Y from formula (1), according to [2], and assign one of the following conditions to the pavement: very good (when $Y \leq 1.00$), good (when $1.01 \leq Y \leq 2.00$), average (when $2.01 \leq Y \leq 3.00$), mediocre (when $3.01 \leq Y \leq 4.00$) or bad (when $Y = 4.00$).

$$Y = 8Z - 6.66S + 0.89R + 13.3D + 8.9N + 2.95 \quad (1)$$

where:

Z – damage index,

S – pavement roughness,

R – pavement's longitudinal evenness,

D – technical wear index,

N – repair index.

wartych w tabeli 1 należy wyznaczyć wskaźnik oceny generalnej Y , ze wzoru (1), wg wytycznych [2], i przypisać nawierzchni jeden z następujących stanów: bardzo dobry (gdy $Y \leq 1,00$), dobry (gdy $1,01 \leq Y \leq 2,00$), średni (gdy $2,01 \leq Y \leq 3,00$), mierny (gdy $3,01 \leq Y \leq 4,00$) lub stan zły (gdy $Y = 4,00$).

$$Y = 8Z - 6,66S + 0,89R + 13,3D + 8,9N + 2,95 \quad (1)$$

w którym:

Z – wskaźnik uszkodzeń,

S – szorstkość nawierzchni,

R – równość podłużna nawierzchni,

D – wskaźnik zużycia technicznego,

N – wskaźnik napraw.

Table 1. Classification of the pavements' service conditions [2]

Tabela 1. Klasyfikacja stanów użytkowych nawierzchni [2]

Pavement class	Wear index [%]	Roughness index			longitudinal evenness		Pavement degradation index	Repair index [%]
		For $V = 200$ km/h	For $V < 200$ km/h	v [%]	Clearance R	v [%]	Cement concrete D [%]	
I	<10	<0.5	<0.57	<12	<4	<12	<1	<1
II	$10 \div 15$	<0.47	>0.54	$12 \div 15$	$4 \div 6$	$12 \div 15$	$1 \div 1.5$	$1 \div 2$
III	$15 \div 20$	$0.43 \div 0.46$	$0.50 \div 0.53$	$15 \div 18$	$6 \div 8$	$15 \div 18$	$1.5 \div 2.0$	$2 \div 3$
IV	$20 \div 25$	$0.40 \div 0.43$	$0.47 \div 0.50$	$18 \div 21$	$8 \div 10$	$18 \div 21$	$2.0 \div 2.5$	$3 \div 4$
V	$25 \div 80$	$0.36 \div 0.4$	$0.43 \div 0.47$	>21	>10	>21	$2.5 \div 3.0$	$4 \div 5$
	$W1 = 0.400$	$W2 = 0.200$			$W3 = 0.176$		$W4 = 0.133$	$W5 = 0.089$

v - coefficient of variation

Due to the on-going exploitation of existing pavements, they are subject to wear and tear, which consists of permanent, undesired changes in the pavement's surface condition and, in consequence, in the entire structure. The subject changes can be divided into continuous changes developed within a specific time interval or gradual changes that appear suddenly (dynamically). All changes in the pavement's parameters result in the shortening of the pavement's designed service life.

3. SCOPE OF TECHNICAL CONDITION EVALUATION – SELECTED EXAMPLES

The evaluation of the airport pavements' technical condition covers the collection and analysis of input data concerning the carrying capacity, evenness, roughness and the surface condition's visual inspection.

One of the most important parameters affecting the airport pavement structure's technical condition evaluation is its carrying capacity [13, 14]. Paper [15]

Na skutek ciągłego procesu eksploatacji istniejących nawierzchni dochodzi do ich zużycia, które polega na trwałych, niepożądanych zmianach stanu przypowierzchniowego, a w konsekwencji również całej konstrukcji nawierzchni. Przedmiotowe zmiany można podzielić na zmiany ciągłe, powstające w ciągu określonego przedziału czasowego, bądź zmiany skokowe, występujące w sposób nagły – dynamiczny. Wszelkie zmiany parametrów nawierzchni skutkują skróceniem projektowanego okresu przydatności nawierzchni do użytku.

3. ZAKRES OCENY STANU TECHNICZNEGO – WYBRANE PRZYKŁADY

Proces oceny stanu technicznego nawierzchni lotniskowych obejmuje zgromadzenie i analizę danych wejściowych dotyczących nośności, równości, szorstkości i oceny wizualnej stanu powierzchni.

Jednym z najważniejszych parametrów wpływających na ocenę stanu technicznego konstrukcji nawierzchni lotniskowej jest jej nośność [13, 14].

presents a non-destructive method of evaluating the airport pavement's carrying capacity with the use of the ACN-PCN method acc. to assumptions [16], based on the aircraft classification number (ACN) acc. to formula (2) and the pavement classification number (PCN).

$$ACN = 2P_r \quad (2)$$

where:

P_r – equivalent load.

The measurement method utilising the HWD device (Fig. 3) is based on measuring the rebound deflection of the tested pavement and determining its change in time. The slab's deflections measurement is conducted under a dynamic load (dump of a specific load of 30-240 kN on the measurement slab with the diameter of 450 mm, adhering to the tested pavement).



W pracy [15] przedstawiono metodę oceny nośności nawierzchni lotniskowej w sposób nieniszczący z wykorzystaniem metody ACN-PCN wg założeń [16] na podstawie liczby klasyfikacyjnej samolotu (ACN) wg wzoru (2) i liczby klasyfikacyjnej nawierzchni (PCN).

$$ACN = 2P_r \quad (2)$$

gdzie:

P_r – obciążenie równoważne.

Metoda pomiaru przy wykorzystaniu urządzenia HWD (*Heavy Weight Deflectometer*) (rys. 3) polega na pomiarze wartości ugięcia sprężystego badanej nawierzchni i określenia jego zmiany w czasie. Pomiar ugięć płyty odbywa się pod wpływem dynamicznego obciążenia (zrzut określonej wartości ciężaru rzędu 30-240 kN na płytę pomiarową o średnicy 450 mm przylegającą do badanej nawierzchni).

Fig. 3. Device intended for measuring the rebound deflections of airport pavements

Rys. 3. Urządzenie do pomiarów ugięć sprężystych nawierzchni lotniskowych

The surface layer's roughness is also important in terms of the pavement's quality [17]. Publication [18] includes a general presentation of the issue of evaluation of the usefulness of systems intended for measuring the friction index of airport pavements' functional elements (Fig. 4) and an example result obtained during the measurement is presented in Figure 5.



Istotna z punktu widzenia jakości nawierzchni jest także szorstkość warstwy powierzchniowej [17]. W publikacji [18] przedstawiono ogólnie problematykę procesu oceny przydatności systemów służących do pomiaru współczynnika tarcia elementów funkcjonalnych nawierzchni lotnisk (rys. 4), a przykładowy pomiar uzyskany w czasie pomiaru zaprezentowano na rysunku 5.

Fig. 4. Device intended for determining the roughness of airport pavements

Rys. 4. Urządzenie do określania szorstkości nawierzchni lotniskowych

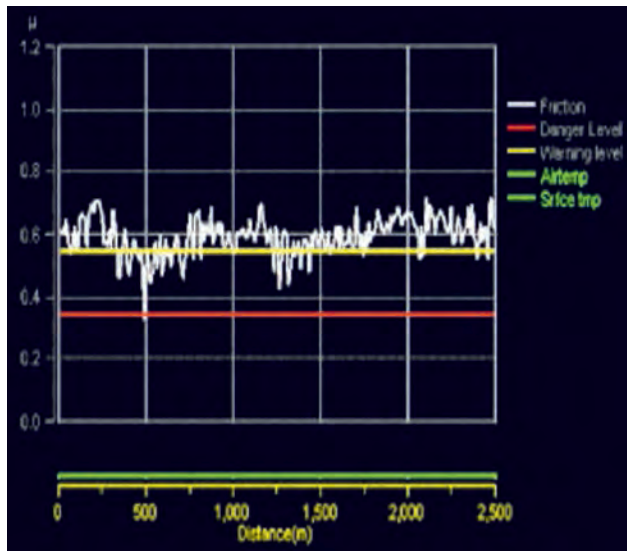


Fig. 5. Example record of an airport pavement's friction index

Rys. 5. Przykładowy zapis pomiaru współczynnika tarcia nawierzchni lotniskowej

The evenness requirement as part of the airport pavements' diagnostic system aspects is set due to the comfort of the utilised structural layouts. An important factor is also the minimisation of the effects of dynamic impacts and the ability to effectively and quickly discharge rainwater from the airport's surface. The device presented in Figure 6 records the displacement of the movable measurement wheel in relation to the four-metre base and allows for measuring the pavement's irregularities in the road length increase function (Fig. 7). In terms of evenness, the facility is evaluated by analysing the average faultiness (acc. to formula (3)), i.e. the percentage measure of the excess irregularities adopted in standard [19] as acceptable.

Wymaganie równości w ramach zagadnień systemu diagnostycznego nawierzchni lotniskowych stawiane jest ze względu na komfort użytkowanych układów konstrukcyjnych. Istotnym czynnikiem jest również minimalizowanie skutków oddziaływań dynamicznych oraz możliwość skutecznego i szybkiego odprowadzenia wód opadowych z powierzchni lotniska. Urządzenie przedstawione na rysunku 6 rejestruje wychylenie ruchomego koła pomiarowego względem czterometrowej bazy i pozwala na pomiar występujących nierówności nawierzchni w funkcji przyrostu długości drogi (rys. 7). Obiekt pod względem równości ocenia się, analizując średnią wadliwość (wg wzoru (3)), czyli procentową miarę liczby przekroczeń wartości nierówności przyjętych w normie [19] jako dopuszczalne.



Fig. 6. Planograph for determining the evenness of airport pavements

Rys. 6. Planograf do określania równości nawierzchni lotniskowych

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} [\%] \quad (3)$$

where:

$i < 1-n$ – number of testing areas,

F_i – surface or zone of the i th testing area.

gdzie:

$i < 1-n$ – liczba obszarów badawczych,

F_i – powierzchnia lub strefa i -tego obszaru badawczego.

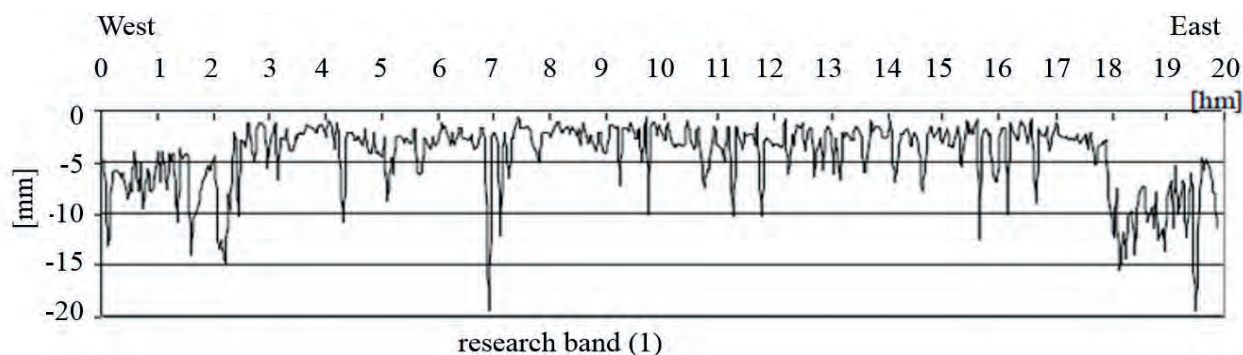


Fig. 7. Example record of an airport pavement's irregularity

Rys. 7. Przykładowy zapis nierówności nawierzchni lotniskowej

For the adopted faultiness criterion [20], the following classification of the airport pavement's evenness was determined: very good condition (when $W \leq 5\%$), good condition (when $5\% < W \leq 10\%$), adequate condition (when $10\% < W \leq 20\%$), unsatisfactory condition (when $20\% < W \leq 50\%$) and an inadequate condition (when $W > 50\%$).

The condition of cement concrete in the pavement can also be determined in a non-destructive manner by using the geo-radar method. These tests allow for identifying the hidden changes in the concrete's structure, including: dampness, details concerning expansion joints, loosening of the surface layer and the subbase or changes in the layers' thickness and delamination. The testing must be conducted in the direction of moving vehicles in the selected profiles, the compaction of which should be chosen individually in a manner providing the pavement's full characteristics. The scope of the structure's in-depth identification depends on the antenna's frequency, therefore in order to obtain more accurate information about the structure's layers, it is recommended to use at least two antennae with varied frequencies (e.g. 1.20 GHz and 500 MHz). An example echogram record made on a concrete pavement is presented in figure 8.

Dla przyjętego kryterium wadliwości [20] określono klasyfikację stanu równości nawierzchni lotniskowych obejmującą: stan bardzo dobry (gdy $W \leq 5\%$), stan dobry (gdy $5\% < W \leq 10\%$), stan dostateczny (gdy $10\% < W \leq 20\%$), stan niezadawalający (gdy $20\% < W \leq 50\%$) i stan niedostateczny (gdy $W > 50\%$).

Stan betonu cementowego w nawierzchni można określić również w sposób nieniszczący, przy wykorzystaniu metody georadarowej. Badania takie umożliwiają rozpoznanie niewidocznych zmian w strukturze betonu, takich jak: zawilgocenia, szczegóły dotyczące szczelin dylatacyjnych, odspojenia między warstwą jezdnią a podbudową czy zmiany miąższości warstw i rozwarstwienia. Badania należy wykonywać zgodnie z kierunkiem poruszających się pojazdów w wybranych profilach, których zagęszczenie powinno być dobierane indywidualnie w sposób zapewniający pełną charakterystykę nawierzchni. Zakres identyfikacji głębszej konstrukcji uzależniony jest od częstotliwości anteny, dlatego też w celu uzyskania dokładniejszych informacji o warstwach konstrukcji w badaniach zaleca się wykorzystywać co najmniej dwie anteny o zróżnicowanych częstotliwościach (np. 1,20 GHz i 500 MHz). Przykładowy zapis echogramu zarejestrowany na nawierzchni betonowej przedstawiono na rysunku 8.

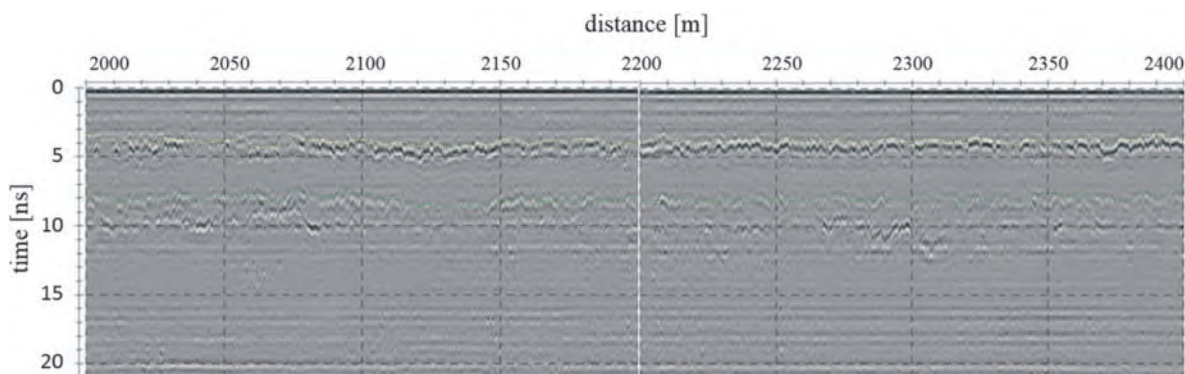


Fig. 8. Echogram recorded on an airport pavement, test section 1, from KM 2+000.00 to KM 2+400.00

Rys. 8. Echogram zarejestrowany na nawierzchni lotniskowej, odcinek badawczy 1, od KM 2+000,00 do KM 2+400,00

The use of the sclerometric method – the Schmidt hammer – allows for non-destructive determination of the structural concrete's compressive strength based on the surface hardness evaluation. In order to determine the average compressive strength using the sclerometric method, it is necessary to select the test sections and then the measurement points along these sections. Each point features 10 designations (Fig. 9) and then the average rebound is determined in terms of the compressive strength at the assumed conversion curve. An example of the data obtained from measurements conducted in four test sections, each 1000 m in length, is presented in Figure 10, while a detailed analysis is provided in Table 2.

Wykorzystanie metody sklerometrycznej – młotka Schmidta – umożliwia określenie w sposób nieniszczący wytrzymałości na ściskanie betonu w konstrukcji na podstawie oceny twardości powierzchniowej. W celu określenia średniej wytrzymałości na ściskanie metodą sklerometryczną należy wytypować odcinki badawcze, a następnie punkty pomiarowe wzdłuż tych odcinków. W każdym z punktów wykonywanych jest po 10 oznaczeń (rys. 9), a następnie określana jest wartość średnia liczby odbicia w przeliczeniu na wytrzymałość na ściskanie, przy założonej krzywej konwersji. Przykład danych uzyskanych z pomiarów w ciągu czterech odcinków badawczych, każdy o długości 1000 m, przedstawiono na rysunku 10, a szczegółową analizę w tabeli 2.

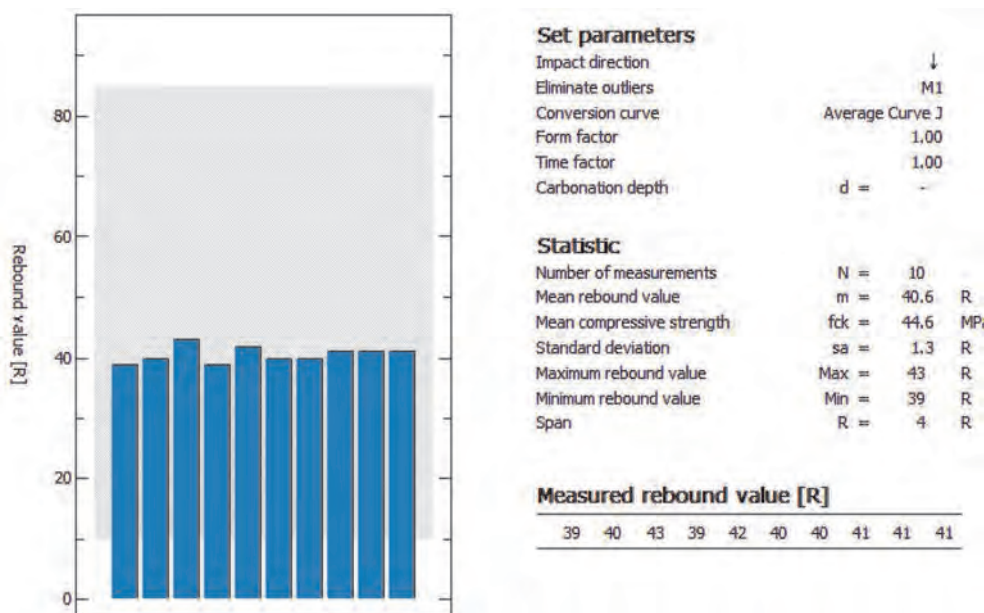


Fig. 9. Example record from a compressive strength measurement obtained during a test conducted using the Digi Schmidt 2N type Schmidt hammer

Rys. 9. Przykładowy zapis pomiaru wytrzymałości na ściskanie uzyskany z badania młotkiem Schmidta typu Digi Schmidt 2N

Table 2. Average compressive strengths for the analysed test sections with cross-sections after every 50 m

Tabela 2. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie dla analizowanych odcinków badawczych w przekrojach co 50 m

KM	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	
2+000.00	55.1	55.8	58.2	52.3	
2+050.00	53.6	53.0	52.5	56.0	
2+100.00	54.2	58.3	54.6	53.6	
2+150.00	58.1	52.3	54.3	52.5	
2+200.00	59.4	57.0	58.3	58.6	
2+250.00	55.1	56.5	53.1	55.5	
2+300.00	57.5	53.0	53.6	59.7	
2+350.00	53.2	53.8	52.8	59.3	
2+400.00	56.1	57.8	54.1	58.2	
2+450.00	54.8	56.4	56.5	56.3	
2+500.00	52.3	51.3	53.3	51.5	
2+550.00	56.7	57.8	58.8	53.8	
2+600.00	53.5	53.3	56.1	57.6	
2+650.00	56.6	55.6	56.5	54.8	
2+700.00	54.3	58.6	55.6	57.6	
2+750.00	58.3	52.7	59.2	59.2	
2+800.00	55.8	56.3	57.0	55.7	
2+850.00	54.6	56.3	55.0	55.1	
2+900.00	53.0	53.8	58.7	54.5	
2+950.00	55.5	53.8	55.6	59.3	
3+000.00	52.9	53.6	55.1	57.6	
	52.3	51.3	52.5	51.5	Minimum value [MPa]
	59.4	58.6	59.2	59.7	Maximum value [MPa]
	55.27	55.09	55.66	56.13	Average value [MPa]
	1.957	2.184	2.111	2.514	Standard deviation [MPa]

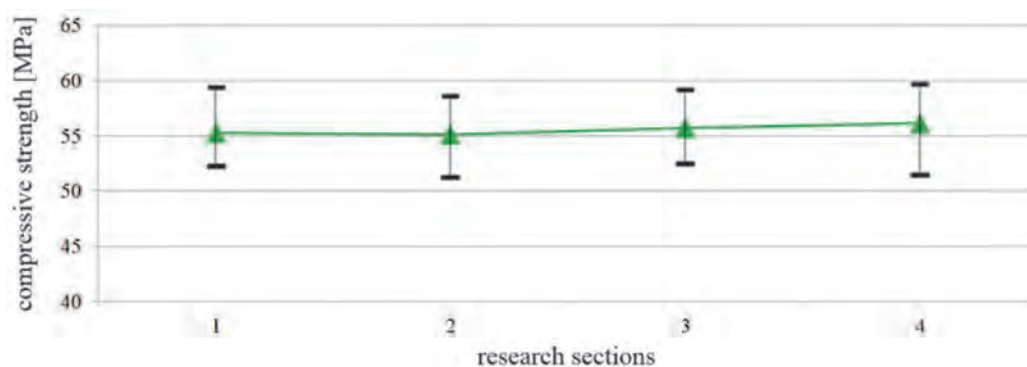


Fig. 10. Average compressive strength for selected test sections, from KM 2+000.00 to KM 3+000.00

Rys. 10. Średnia wartość wytrzymałości na ściskanie dla wybranych odcinków badawczych, od KM 2+000,00 do KM 3+000,00

An extension of the standard tests determining the parameters of concrete in the pavement structure should include observations of the internal structure of cured cement concrete. Special attention must be paid to the surface layer, because it is here that the destructive

Rozszerzeniem standardowo stosowanych badań określających parametry betonu w konstrukcji nawierzchni powinny być obserwacje struktury wewnętrznej stwardniałego betonu cementowego. Szczególną uwagę należy zwrócić na warstwę przy-

impact of atmospheric conditions, intensified by the service load (e.g. hot exhaust fume gases emitted from the nozzles of aircrafts taking off) can enhance the formation of surface damage (Fig. 11).



powierzchniową, ponieważ to właśnie w tym obszarze destrukcyjne oddziaływanie warunków środowiskowych, spotęgowane obciążeniem eksploatacyjnym (np. gorące gazy spalinowe emitowane z dysz starujących statków powietrznych), może potęgować powstawanie uszkodzeń powierzchniowych (rys. 11).

Fig. 11. Example pavement with altered colouring due to repeated impact of temperature deriving from the aircrafts' thermal emissions

Rys. 11. Przykład nawierzchni o zmienionym zabarwieniu na skutek wielokrotnego oddziaływania temperatury pochodzącej z emisji termicznej statków powietrznych

The changes that take place in the cement matrix substantially affect the concrete's mechanical parameters [1]. In relation to pavement concrete, these parameters are the basic factors that determine its durability. In cured concrete, it is possible to distinguish the cement matrix, coarse and fine aggregate grains (usually with a varied mineral composition and varied shapes and dimensions), pores and air voids, crevices and cracks as well as various reinforcement. The most important components of cured concrete include the contact layers between the aggregate grains and the cement grout. Due to their physical (increased porosity) and mechanical (reduced strength) properties, the zones play an important role in the pavement's destruction process. Due to the fact that the surroundings of this zone features micro-cracking, the contact layer between the cement matrix and the aggregated grains is deemed as the weakest element of the cured concrete's micro-structure. Micro-structural observations in the proposed testing, conducted periodically in the perspective of several years, allow for correlating the changes taking place in the cured concrete with the changes in the mechanical

Zmiany, jakie zachodzą w matrycy cementowej, wpływają w istotny sposób na parametry mechaniczne betonu [1]. Parametry te w odniesieniu do betonu w nawierzchni są podstawowymi czynnikami determinującymi jej trwałość. W stwardniałym betonie można wyróżnić matrycę cementową, ziarna kruszywa grubego i drobnego (przeważnie o zróżnicowanym składzie mineralnym oraz zróżnicowanych kształtach i wymiarach), pory i pustki powietrzne, rysy i spękania oraz różnego rodzaju zbrojenie. Do najistotniejszych elementów składowych stwardniałego betonu należy zaliczyć warstwy kontaktowe występujące pomiędzy ziarnami kruszyw a zaczynem cementowym. Strefy te, ze względu na właściwości fizyczne (zwiększona porowatość) i mechaniczne (mniejsza wytrzymałość), odgrywają istotną rolę w procesie niszczenia nawierzchni. Ponieważ w obrębie tej strefy pojawiają się mikrospeknięcia warstwa kontaktowa matryca cementowa-ziarna kruszywa uznawana jest za najsłabszy element mikrostruktury stwardniałego betonu. Obserwacje mikrostrukturalne w proponowanych badaniach wykonywane cyklicznie w perspektywie kilku lat umożliwią powiązanie zmian zachodzących w stwardniałym betonie ze

or service parameters of the pavement concrete. The observations of samples collected from the exploited pavements at locations of aircraft traffic conducted thus far demonstrated a substantial impact of the traffic conditions and of destructive factors on the changes in the surface layer. Based on the observations of sample surfaces in the Scanning Electron Microscope, a change in the concrete's micro-structure and a network of micro-cracks, causing partial delamination of the material's top layer, were ascertained (Fig. 12a). Numerous micro-cracks were observed in the cement matrix and cracks in the contact zone of the matrix and aggregate grains. The cross-section of the analysed samples featured an altered concrete micro-structure in the surface layer (Fig. 12). The layer is characterised with increased porosity, altered crystallisation and numerous micro-crevices with substantial widths. The micro-crevices are causing the loosening of the material's top layer. The destructive impact of aircrafts on the concrete airport pavements is also confirmed by the concrete's chemical composition analyses. The surface layer features increases carbon and sulphur contents compared to lower layers by approx. 60-70%.

zmianami parametrów mechanicznych czy eksploatacyjnych betonu w nawierzchni. Wykonane dotychczas obserwacje próbek pobranych z eksploatowanych nawierzchni w miejscach poruszających się statków powietrznych wykazały istotny wpływ warunków ruchu i czynników destrukcyjnych na zmiany w warstwie powierzchniowej. Na podstawie obserwacji w skaningowym mikroskopie elektronowym powierzchni próbek stwierdzono zmianę mikrostruktury betonu oraz sieć mikrospekkań powodującą częściowe odspajanie górnej warstwy materiału (rys. 12a). Zaobserwowano bardzo liczne mikrospekkania, zarówno samej matrycy cementowej, jak również spekkania w strefie kontaktu matrycy z ziarnami kruszyw. W przekroju analizowanych próbek ujawniono w warstwie przypowierzchniowej zmienioną mikrostrukturę betonu (rys. 12). Warstwa ta charakteryzuje się zwiększoną porowatością, zmienioną krystalizacją oraz licznymi mikrorysami o znacznych rozwartościach. Mikrorysy powodują odspajanie górnej warstwy materiału. Destrukcyjne oddziaływanie statków powietrznych na betonowe nawierzchnie lotniskowe potwierdzają również analizy składu chemicznego betonu. W warstwie przypowierzchniowej stwierdzono zwiększoną zawartość węgla i siarki w stosunku do warstw niżej leżących o ok. 60-70%.

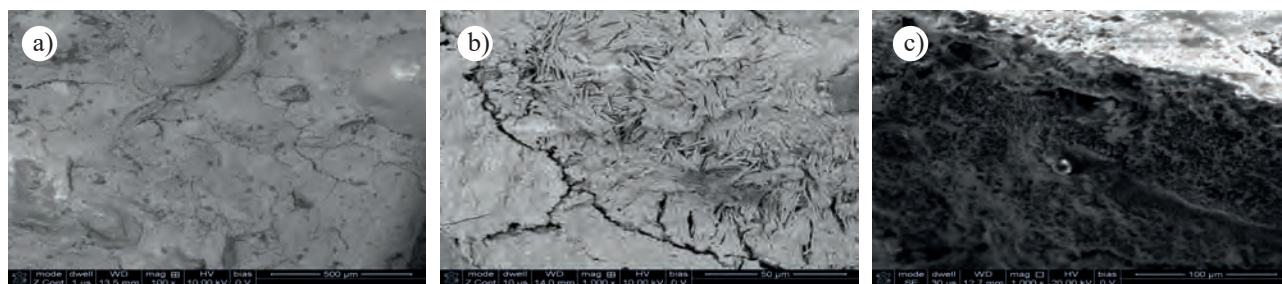


Fig. 12. Micro-structure of samples of concrete collected from the exploited pavement: (a) sample surface, (b) cement matrix, c) surface layer (10.00KX zoom)

Rys. 12. Mikrostruktura próbek betonu pobranego z eksploatowanej nawierzchni: (a) powierzchnia próbki, (b) matryca cementowa, c) warstwa przypowierzchniowa (powiększenie 10.00KX)

The observed micro-scale damage can develop and propagate into the macro-scale in sufficient conditions. Then, it is possible to catalogue them during visual inspection as part of the pavement condition's evaluation (Fig. 13). The evaluation utilises the assumptions [21] by adopting the damage specified in Table 3 and designating the pavement's degradation degree according to formula (4) [22].

Obserwowane uszkodzenia w skali mikro, w sprzyjających warunkach mogą rozwijać się i propagować do skali makro. Wówczas na etapie oceny wizualnej w ramach oceny stanu nawierzchni możliwe jest ich z inventaryzowanie (rys. 13). Do oceny wykorzystuje się założenia [21], przyjmując uszkodzenia przedstawione w tabeli 3 i ostatecznie wyznaczając stopień degradacji nawierzchni zgodnie ze wzorem (4) [22].

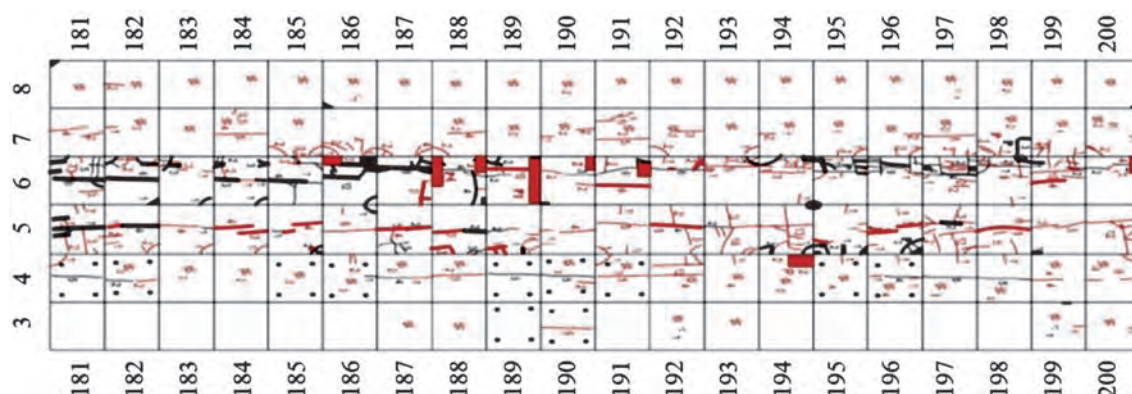


Fig. 13. Example record of damage in an airport pavement made from cement concrete

Rys. 13. Przykładowy rejestr występujących uszkodzeń na nawierzchni lotniskowej z betonu cementowego

$$D_{BC} = \frac{D_{Ap} + D_{Bg} + D_{Pm} + D_{Pw} + D_{Op} + D_{Now} + D_{Vg} + D_{Ps} + D_{Psszer} + D_M + D_{Pr} + D_O + D_{Wp}}{13} \quad (4)$$

Parameter	Mark	Unit of measure
shallow peeling	A_p	m ²
deep peeling	B_g	m ²
frost cracking	P_m	m ²
capillary cracking	P_w	m ²
chipping	O_p	items
breaking, edge and corner	N_{ow}	items
deep cavities	U_g	m ²
crevice cracking	P_s	m
wide crevice cracking	P_{sszer}	m
mass in crevices	M	m
thresholds	P_r	items
drill openings	O	items
slab replacement	W_p	m ²

Table 3. Specific types of damage for visual inspection

Tabela 3. Wyszczególnione rodzaje uszkodzeń do oceny wizualnej

4. SUMMARY

Taking into consideration the assurance of the high level of safety of air traffic and the durability of airport pavements, there is a need for continuous monitoring of the technical condition of concrete airport pavements.

The adopted airport pavement technical condition evaluation process is a reliable tool allowing for obtaining the pavement's condition index in the form of input data. The proposed extension of diagnostics with geo-radar measurements will allow for identifying cross-sections that deviate from the standard values and enable quicker and more complete verification of the pavement's condition. The SEM observations of concrete samples from selected pavement areas can

4. WNIOSKI

Mając na uwadze zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa ruchu lotniczego i trwałości eksploatacyjnej nawierzchni lotniskowych, istnieje potrzeba systematycznego monitorowania stanu technicznego betonowych nawierzchni lotniskowych.

Przyjęty proces oceny stanu technicznego nawierzchni lotniskowych jest wiarygodnym narzędziem umożliwiającym uzyskanie, jako danych wyjściowych, wskaźnika stanu nawierzchni. Zaproponowane rozszerzenie diagnostyki o pomiary georadarowe umożliwi identyfikację przekrojów odbiegających od wartości normowych i pozwoli na szybszą oraz pełniejszą weryfikację stanu nawierzchni. Obserwacje w SEM próbek betonu z wybranych

unambiguously constitute the basis for determining the structural concrete's condition and the changes taking place in the cement composite.

obszarów nawierzchni w jednoznaczny sposób mogą stanowić podstawę wnioskowania o stanie betonu w konstrukcji i zachodzących zmianach w kompozycie cementowym.

REFERENCES

- [1] Glinicki M.A.: *Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych. Wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka* [Hardness of concrete in road pavements. Impact of micro-structure, material designing, diagnostics]. Wydawnictwo Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Warsaw 2011.
- [2] Nita P.: *Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych* [Construction and maintenance of airport pavements]. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warsaw 2008.
- [4] NO-17-A205: 2017 Winter airport pavement maintenance. Use of de-icing agents. Requirements and testing.
- [5] Kowalska D., Wesołowski M.: *Bezpieczne lądowanie. Nawierzchnie asfaltowe (1-2)* [Safe landing. Asphalt pavement (1-2)], 2018, pp. 14-19.
- [6] Linek M.: *Beton nawierzchniowy o podwyższonych parametrach fizycznych i mechanicznych na działanie wymuszonych obciążeń temperatury* [Pavement concrete with improved physical and mechanical parameters against coerced temperature loads]. Kielce 2013.
- [9] Linek M., Piotrowska-Nowak P., Nita P.: *Termiczna odporność betonowych nawierzchni lotniskowych i jej skutki dla procesu użytkowania* [Thermal resistance of concrete airport pavements and its effects for the exploitation process]. Journal of KONBiN, 2017.
- [13] NO-17-A500:2016. *Nawierzchnie lotniskowe i drogowe. Badania nośności* [Airport and road pavements. Carrying capacity testing].
- [14] Wesołowski M.: *Badania nośności mobilnych pokryć kompozytowych stosowanych do odbudowy nawierzchni lotniskowych* [Testing the carrying capacity of mobile composite coatings used for airport pavement reconstruction]. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, XXXIII, 63, 2016, pp. 437-444.
- [15] Wesołowski M., Błacha K.: *Ocena nośności konstrukcji nawierzchni lotniskowych metodą ACN-PCN* [Evaluation of the carrying capacity of airport pavements using the ACN-PCN method]. Prace Naukowe ITWL, 35, 2014, pp. 5-21.
- [17] NO-17-A501:2015. *Nawierzchnie lotniskowe - Badania szorstkości* [Airport pavements – Roughness testing].
- [18] Wesołowski M., Barszcz P., Błacha K.: *Badania porównawcze urządzeń przeznaczonych do ciągłego pomiaru współczynnika tarcia nawierzchni elementów funkcjonalnych lotnisk* [Comparative testing of devices intended for continuous measurement of the friction index in airport functional elements' pavements]. Acta Sci. Pol. Architectura, 16, 3, 2017, pp. 137-145.
- [19] NO-17-A204:2015. *Lotniskowe nawierzchnie betonowe. Wymagania i metody badań nawierzchni z betonu cementowego* [Concrete airport pavements. Requirements and methods of testing cement concrete pavements].
- [20] NO-17-A502:2015. *Nawierzchnie lotniskowe – Badania równości* [Airport pavements – Evenness testing].
- [21] Poświata A., Wesołowski M., Kowalska D.: *Współczesne betonowe nawierzchnie lotniskowe w Polsce – wybrane problemy* [Modern concrete airport pavements in Poland – selected issues], Konferencja Dni Betonu, 2014.
- [22] Nita P., Wesołowski M. e.t.c.: *Dobór parametrów i wskaźników charakteryzujących stopień zdegradowania płyt stanowiących elementy nawierzchni lotniskowych wykonanych z betonu cementowego w oparciu o dane uzyskane z eksploatowanych obiektów* [Selection of parameters and indices characterising the degradation degree of slabs constituting elements of airport pavements made from cement concrete, based on the data obtained from exploited facilities], ITWL, Warsaw 2016.

Acknowledgments:

The work was financed by Kielce University of Technology, Department of Transportation Engineering, Air Force Institute of Technology, Warsaw

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską Kielce, Instytut Lotnictwa, Katedra Inżynierii Transportu, Warszawa



environment
environment



NATALIA KRAWCZYK

ZDZISŁAW PIASTA

Kielce University of Technology

e-mail: nattk1995@onet.pl

Manuscript submitted 2019.09.28 – revised 2019.10.15,
initially accepted for publication 2019.11.20, published in December 2019

PRELIMINARY TEST RESULTS OF THERMAL COMFORT IN A CLASSROOM

WSTĘPNE WYNIKI BADAŃ KOMFORTU CIEPLNEGO W SALI LEKCYJNEJ

DOI: 10.30540/sae-2019-021

Abstract

The paper presents the issue of thermal comfort based on the conducted study. First, the definition and importance of thermal comfort was discussed. Then, air parameters were measured and surveys were conducted regarding questions about the assessment of thermal comfort of persons using the room. The list of the subject thermal comfort evaluation tests are illustrated in the diagrams. The impact of gender and BMI on the Predicted Mean Vote PMV were also analyzed. In the next part, results obtained from surveys and according to formulas from the standard were developed, and then compared.

Keywords: thermal comfort, indoor air quality, thermal sensations

Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienie komfortu cieplnego w oparciu o przeprowadzone badanie. Najpierw omówiono definicję i znaczenie komfortu cieplnego. Następnie wykonano pomiary parametrów powietrza oraz przeprowadzono ankiety dotyczące pytań o ocenę komfortu cieplnego osób użytkujących pomieszczenie. Zestawienia badań oceny komfortu cieplnego zilustrowano na wykresach. Analizie poddano także wpływ płci i wskaźnika BMI na przewidywaną średnią ocenę PMV. W kolejnej części opracowano wyniki otrzymane z ankiet oraz według wzorów z normy, a następnie je porównano.

Słowa kluczowe: komfort cieplny, jakość powietrza w pomieszczeniu, odczucia termiczne

1. INTRODUCTION

Thermal comfort is a very important aspect regarding the conditions that should prevail in the room. To achieve thermal comfort, the microclimate of the room is adjusted by changing the thermal conditions. The basic data on the comfort of heat felt by people in different thermal environments are their individual assessments. He strives to achieve satisfaction among people staying in a given place. Unfortunately, this result will never be completely satisfactory for everyone, due to human biological differences [1].

When assessing thermal sensations, thermal comfort scales are used. The PMV (Predicted Mean Vote) indicator is used to describe thermal comfort in confined spaces. Used mainly in air conditioning.

1. WPROWADZENIE

Komfort cieplny jest bardzo ważnym aspektem dotyczącym warunków, jakie powinny panować w pomieszczeniu. Aby go uzyskać, reguluje się mikroklimat pomieszczenia, zmieniając warunki cieplne. Podstawowymi danymi na temat komfortu ciepła odczuwalnego przez ludzi znajdujących się w różnych środowiskach cieplnych są ich indywidualne oceny. Dąży on do osiągnięcia zadowolenia wśród ludzi przebywających w danym miejscu. Wynik ten niestety, nigdy nie będzie w pełni satysfakcjonujący dla każdego ze względu na różnice biologiczne człowieka [1].

Przy ocenie odczuć cieplnych stosuje się skale komfortu cieplnego. Wskaźnik PMV (Predicted Mean Vote) jest stosowany w opisie komfortu cieplnego w po-

Describes human thermal sensations, expressed on a seven-level scale of thermal sensations. Bedford's comfort zone includes three middle ratings: „pleasantly warm”, „pleasantly” and „pleasantly cool”. However, according to the American ASHRAE standard, there will be four ratings: „neither too warm”, „slightly warm”, „nor too cold” and „slightly cold” [2, 3, 10].

The key element of feeling thermal comfort is air temperature. The influence of other important factors on thermal comfort depends on it. The human body is adapted to operate in a wide temperature range, despite the fact that only in a narrow range is the actual thermal comfort felt, providing a pleasant sensation with the sensation of temperature.

The average neutral temperature for people of different ages and sex is about 25-26°C at a relative humidity of 50%, low physical activity, as well as clothing with thermal insulation for light clothing (0.5÷0.6 clo) [1].

Many factors influence comfort or physiological-psychological discomfort resulting from the interaction of man and the environment. In the rooms, physical activity performed by people, their clothing and air parameters are important [10]. When a large number of people are in the room, proper temperature control is important. At the optimal air temperature there are statistically 5% dissatisfied people. An important aspect is to maintain the air temperature in rooms intended for a large group of people [4]. The humidity is also an important factor. Man feels best at humidity in the range of 40÷60%. A value of <30% causes dry skin and eye irritation. If the relative humidity is >70%, there is a feeling of skin moisture and discomfort [5].

2. SUBJECT AND SCOPE OF RESEARCH

The ENERGIS building is an energy-saving didactic and laboratory building located at Warszawska Street in Kielce, put into use in 2012. The facility is entirely powered by renewable energy sources for the needs of the Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering. Combines teaching, research and scientific functions. Photovoltaic and solar panels operate here, heat pumps and air handling units work, and the recovered heat heats utility water. There is also a biomass boiler room. These installations are also didactic positions [6].

The ENERGIS building has a monolithic reinforced concrete structure. The external walls of the building

mieszczonych zamkniętych. Stosowany głównie w klimatyzacji. Opisuje wrażenia cieplne człowieka, wyrażone w siedmiostopniowej skali wrażeń cieplnych. Do strefy komfortu wg Bedforda zalicza się trzy środkowe oceny: „przyjemnie ciepło”, „przyjemnie” oraz „przyjemnie chłodno”. Natomiast wg amerykańskiej normy ASHRAE będą to cztery oceny: „ani za ciepło”, „lekko ciepło”, „ani za zimno” i „lekko chłodno” [2, 3, 10].

Kluczowym elementem odczuwania komfortu cieplnego jest temperatura powietrza. Od niej zależy wpływ innych czynników na komfort cieplny. Organizm ludzki jest przystosowany do funkcjonowania w szerokim przedziale temperaturowym, pomimo to tylko o wąskim zakresie jest odczuwalny faktyczny komfort cieplny dostarczający przyjemnych wrażeń związanych z odczuwaniem temperatury. Średnia temperatura obojętna dla ludzi różnego wieku oraz płci wynosi około 25-26°C przy wilgotności względnej równej 50%, niskiej aktywności fizycznej, a także ubiorze o izolacyjności cieplnej dla ubioru lekkiego (0,5÷0,6 clo) [1].

Wpływ na komfort lub dyskomfort fizjologiczno-psychiczny, wynikający ze wzajemnego oddziaływania człowieka i środowiska, ma wiele czynników. W pomieszczeniach istotne znaczenie ma wykonywana aktywność fizyczna przez ludzi, ich ubiór oraz parametry powietrza [10]. Kiedy w pomieszczeniu przebywa duża liczba osób ważna jest regulacja temperatury. W optymalnej temperaturze powietrza jest statystycznie 5% osób niezadowolonych. Istotnym aspektem jest utrzymanie temperatury powietrza w pomieszczeniach przeznaczonych dla dużej grupy ludzi [4]. Ważnym czynnikiem jest też wilgotność powietrza. Człowiek najlepiej czuje się przy wilgotności w przedziale 40÷60%. Wartość <30% powoduje suchość skóry i podrażnienie oczu. Jeśli wilgotność względna jest >70%, odczuwalne jest zawilgocenie skóry oraz dyskomfort [5].

2. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Budynek ENERGIS jest energooszczędnym obiektem dydaktyczno-laboratoryjnym znajdującym się przy ulicy Warszawskiej w Kielcach, oddanym do użytku w 2012 roku, w całości jest zasilany z odnawialnych źródeł energii na potrzeby Wydziału Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki. Łączy funkcje dydaktyczne, badawcze i naukowe. Funkcjonują tu fotowoltaika i panele słoneczne, pracują pompy ciepła, centrale wentylacyjne, a odzyskiwane ciepło podgrzewa wodę użytkową. Pracuje również kotłownia na biomasę. Instalacje te są jednocześnie stanowiskami dydaktycznymi [6].

are insulated with 25 cm thick polystyrene, while the internal walls are made of ceramic brick [7].

The study was conducted in October in the ENERGIS building and the outside temperature was 15°C. During the test, a microclimate meter was used to determine air parameters. The air temperature, black ball temperature and relative humidity were subjected to these tests. At the same time, people in the room completed a survey on the characteristics of the thermal sensations of the microclimate.

3. TEST RESULTS

16 people took part in the study. The room temperature was 23.8°C and the relative humidity was 36.65%. This allowed for expressing an assessment of thermal comfort and their preferences for the conditions in the room in which they stayed. Based on this study, the opinions of the respondents were compared with the Predicted Average PMV Rating set by the standard for relevant factors. The PMV indicator is an indicator enabling determination of the average rating of a group of people on a seven-level psychophysical rating scale [3]. Figure 1 shows the PMV results obtained according to the standard.

Budynek ENERGIS ma konstrukcję żelbetową monolityczną. Ściany zewnętrzne budynku ocieplone są styropianem o grubości 25 cm, zaś ściany wewnętrzne murowane z cegły ceramicznej [7].

Badanie zostało przeprowadzone w październiku w budynku ENERGIS, a temperatura zewnętrzna wynosiła 15°C. W czasie wykonywanego badania został wykorzystany miernik mikroklimatu, aby wyznaczyć parametry powietrza. Tym badaniom podlegała temperatura powietrza, temperatura czarnej kuli oraz wilgotność względna. W tym samym czasie osoby znajdujące się w pomieszczeniu wypełniały ankietę dotyczącą charakterystyki wrażeń cieplnych mikroklimatu.

3. WYNIKI BADAŃ

W badaniu brało udział 16 osób. Temperatura w pomieszczeniu wynosiła 23,8°C, a wilgotność względna 36,65%. Pozwoliło to na wyrażenie oceny komfortu cieplnego i ich preferencji do warunków panujących w pomieszczeniu, w którym przebywali. Na podstawie tego badania porównano opinie ankietowanych z przewidywaną średnią oceną PMV, określoną przez normę dla odpowiednich czynników. Wskaźnik PMV to wskaźnik umożliwiający określenie średniej oceny grupy osób na siedmiostopniowej, psychofizycznej skali ocen [3]. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki PMV uzyskane według normy.

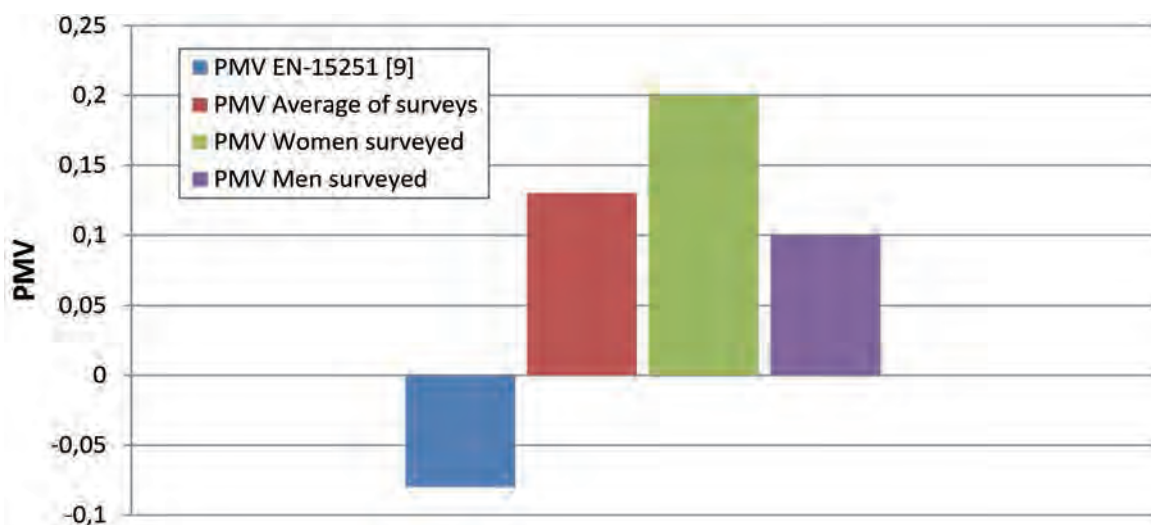


Fig. 1. PMV diagram for the given parameters

Rys. 1. Wykres PMV dla podanych parametrów

Based on a calculator based on the EN-15251 [9] standard, PMV is equal to -0.08. PMV for 16 people is 0.13, while for men 0.2 and for women 0.1. Figure 2 shows PMV responses according to respondents.

Na podstawie kalkulatora skonstruowanego w oparciu o normę EN-15251 [9] PMV jest równe -0,08. PMV dla 16 osób wynosi 0,13, zaś osobno dla mężczyzn 0,2, a dla kobiet 0,1. Na rysunku 2 przedstawiono odpowiedzi PMV według ankietowanych.

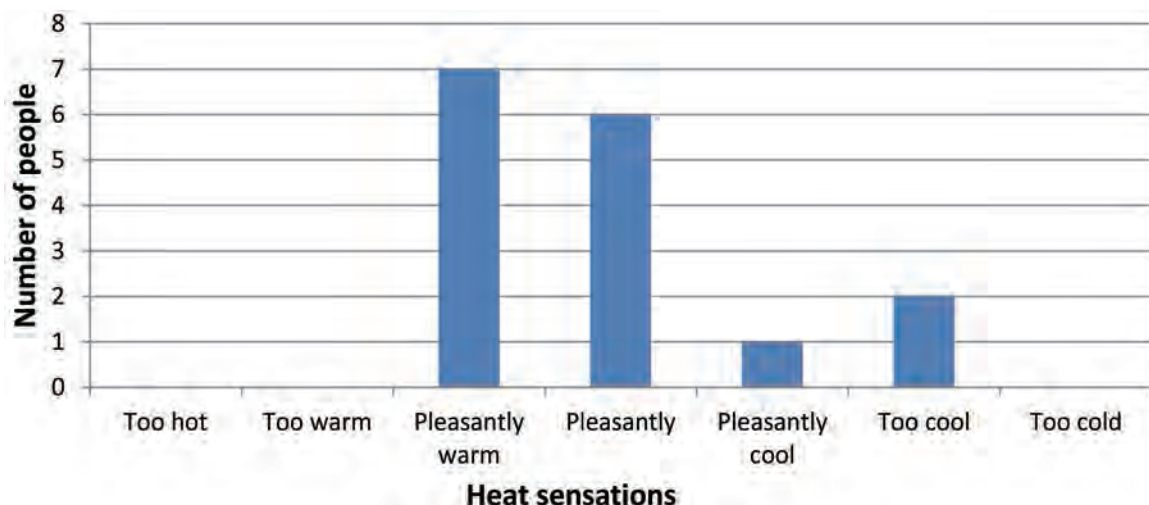


Fig. 2. Thermal feelings according to respondents

Rys. 2. Odczucia termiczne według ankietowanych

6 people feel thermal comfort, 7 people are pleasantly warm, 1 person says it is pleasantly cool, while 2 people are dissatisfied with the prevailing conditions. The calculated PMV value based on the opinions of respondents is 0.13. Figure 3 shows the temperature rating.

6 osób odczuwa komfort cieplny, 7 osobom jest przyjemnie ciepło, 1 osoba twierdzi, że jest przyjemnie chłodno, natomiast 2 osoby są niezadowolone z panujących warunków. Wyliczona wartość PMV na podstawie opinii ankietowanych wynosi 0,13. Rysunek 3 przedstawia ocenę temperatury.

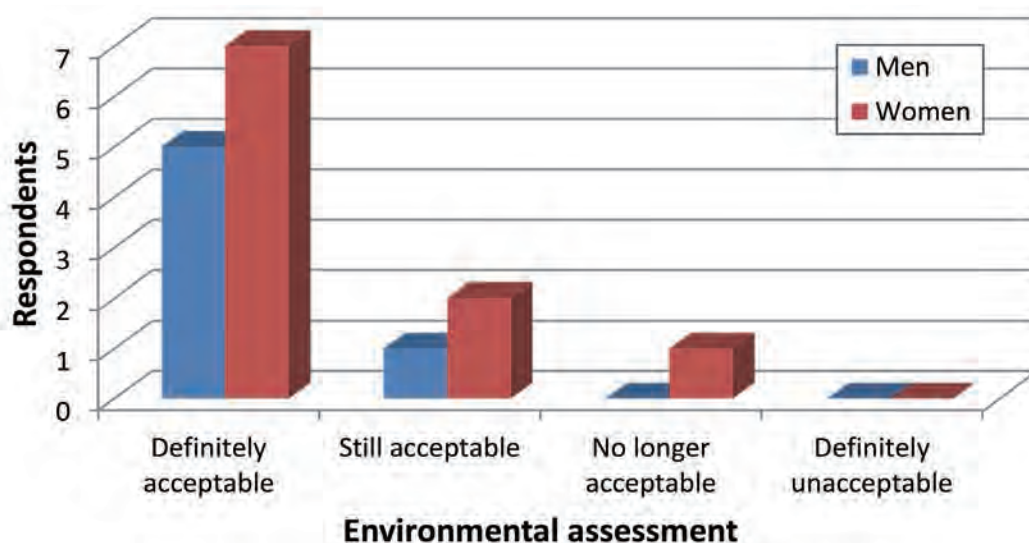


Fig. 3. Graph of air temperature assessment by respondents

Rys. 3. Wykres oceny temperatury powietrza przez ankietowanych

Figure 3 shows that 75% of all respondents correspond to indoor conditions, 18.75% believe that the air temperature is still acceptable. Only 6.25% of respondents believe that the air temperature is unacceptable.

The Figure 4 is shows relationship between air temperature and individual preferences.

Z rysunku 3 wynika, że 75% wszystkich ankietowanych odpowiadają warunki wewnątrz pomieszczenia, 18,75% uważa, że temperatura powietrza jest jeszcze do przyjęcia. Tylko 6,25% ankietowanych uważa, że temperatura powietrza już nie jest do przyjęcia.

Na rysunku 4 przedstawiono relacje pomiędzy temperaturą powietrza a indywidualnymi preferencjami.

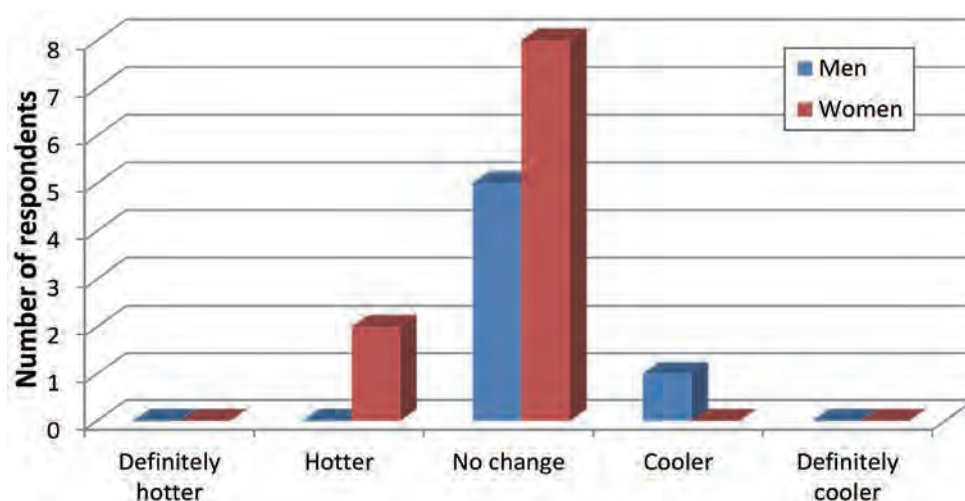


Fig. 4. Graph of air temperature preferences by respondents

Rys. 4. Wykres preferencji temperatury powietrza przez ankietowanych

Only 2 women prefer it to be warmer, which is 12.5%. 13 people want the temperature to be unchanged, i.e. 81.25% of all respondents. One person would like it to be cooler, which is 6.25%.

Studies have shown that indoor climate conditions are good for people. The PMV value from the opinion of the respondents is 0.13, which guarantees a feeling of thermal comfort. Parameters calculated using the standard [9] and according to respondents are in the PMV range from $-0.5 \div 0.5$. Then it was checked how BMI and clothing affect the feeling of comfort (Fig. 5).

Jedynie 2 kobiety wolą, aby było cieplej, co stanowi 12,5%. 13 osób chce, aby temperatura była bez zmian, czyli 81,25% wszystkich ankietowanych. Jedna osoba chciałaby, żeby było chłodniej, co stanowi 6,25%.

Badania wykazały, że osobom wewnątrz pomieszczenia odpowiadają warunki klimatu. Wartość PMV z opinii ankietowanych wynosi 0,13, co gwarantuje odczucie komfortu cieplnego. Parametry wyliczone za pomocą normy [9], jak i według ankietowanych mieszczą się w zakresie PMV $-0.5 \div 0.5$. Następnie sprawdzono jaki wpływ na odczucie komfortu ma BMI i ubiór (rys. 5).

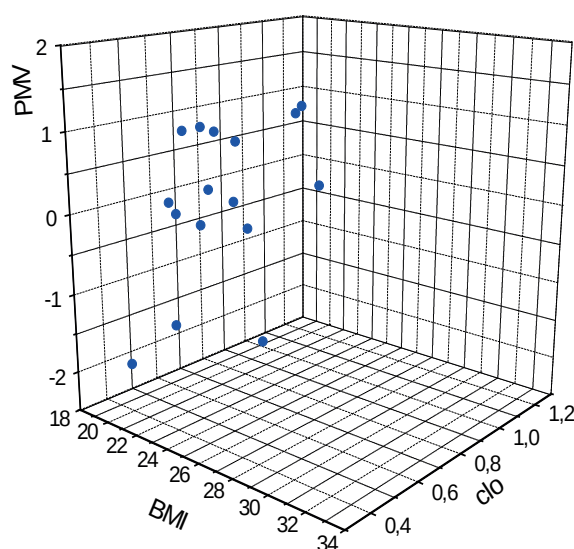


Fig. 5. Graph of air temperature preferences by respondents

Rys. 5. Wykres preferencji temperatury powietrza przez ankietowanych

Based on the results obtained, it can be stated that as the body mass index BMI (Body Mass Index)

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wskaźnika masy ciała BMI

and the clothing's thermal resistance increase, the respondents define the conditions as „pleasantly warm”. Only 3 people prefer a higher temperature.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The thermal comfort test took place in the intelligent ENERGIS building in autumn. Based on the study, it can be concluded that the respondents are satisfied with the room temperature. 75% of respondents are satisfied with the environment in which they are located. Only one woman believes that the air temperature is no longer acceptable, which is 6.25% of respondents. It can be concluded that women are more prone to temperature sensations. Men in this aspect are usually indifferent. Standard guidelines for the calculation of thermal comfort for the predicted assessment of the average PMV do not differ much from the surveys carried out and are within ± 0.2 . Thermal comfort tests will be continued in further publications.

(Body Mass Index) i oporu cieplnego odzieży ankietowani określają warunki jako „przyjemnie ciepło”. Tylko 3 osoby wolą temperaturę wyższą.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badanie komfortu cieplnego miało miejsce w inteligentnym budynku ENERGIS w warunkach jesiennych. Na podstawie wykonanego badania można wywnioskować, że ankietowanym odpowiada temperatura w pomieszczeniu. 75% badanych jest zadowolonych ze środowiska, w którym się znajdują. Tylko jedna kobieta uważa, że temperatura powietrza już nie jest do przyjęcia, co stanowi 6,25% ankietowanych. Można uznać, iż kobiety są bardziej podatne na odczucia temperatur. Mężczyźni w tym aspekcie są z reguły obojętni. Wytyczne normowe co do obliczenia komfortu cieplnego dla przewidywanej oceny średniej PMV niewiele się różnią od przeprowadzonych ankiet i mieszczą się w granicy $\pm 0,2$. Badania komfortu cieplnego będą kontynuowane w dalszych publikacjach.

REFERENCES

- [1] Fanger P.O.: *Komfort cieplny*, tł. doc. dr inż. K. Kostyrko, dr A. Kostyrko, Arkady 1974.
- [2] Bedford T.: *The warmth factor in Comfort at work*. MRC industrial health board. London HMSO 1936.
- [3] ASHRAE Standard Thermal Environmental Conditions for Human Occuoancy, 2003.
- [4] Śliwowski L.: *Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [5] PN-EN ISO 7730: 2006 *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort Rusing calculation of the PMV and PPD indices and local thermal Comfort criteria*.
- [6] Website: http://energis.tu.kielce.pl/index.php/krotki_opis_projektu (access 15.10.2019).
- [7] Tracz W., Piotrowski J.Z.: *Projekt budynku dydaktyczno-laboratoryjnego z łącznikiem wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach*, Kielce 2008.
- [8] Website: <http://comfort.cbe.berkeley.edu/> (access 15.10.2019).
- [9] PN-EN 15251: 2006 *Indoor environment al input parameters for design and assessment of energy performance of bildings ad dressing indor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.
- [10] Bartal I., Banhidi Hc. L., Garbai L.: *Analysis of the static thermal comfort equation*, Energy Buildings, Department of Building Service Engineering and Process Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Muegyetem” rkp. 3, Hungary 2012.

Acknowledgments:

The work was financed by Kielce University of Technology

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską w Kielcach



ROBERT KOWALIK
JAROSŁAW GAWDZIK
Kielce University of Technology
BARBARA GAWDZIK
Jan Kochanowski University in Kielce
e-mail: rkowalik@tu.kielce.pl

Manuscript submitted 2019.11.04 – revised 2019.11.15,
initially accepted for publication 2019.11.18, published in December 2019

RISK ANALYSIS OF ACCUMULATION OF HEAVY METALS FROM SEWAGE SLUDGE IN SOIL FROM THE SEWAGE TREATMENT PLANT IN STARACHOWICE

ANALIZA RYZYKA KUMULACJI METALI CIĘŻKICH Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH W GLEBIE POCHODZĄCYCH Z OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W STARACHOWICACH

DOI: 10.30540/sae-2019-022

Abstract

Sewage sludge from sewage treatment plants has important soil-forming and fertilizing properties. However, they cannot always be used for this purpose. One of the main reasons why sludge cannot be used for natural purposes is its heavy metal content. Sewage sludge from the treatment plant in Starachowice has been subjected to an analysis of the potential risk of heavy metals, especially in terms of their mobility and geoaccumulation. The calculations were made for the concentrations of heavy metals in sewage sludge taken from the treatment plant in Starachowice and in arable soil from the measurement point at the place of its potential use. Geoaccumulation index (Igeo) and potential ecological risk index (PERI) were calculated. The analysis of the results shows that although the geo-accumulation index and the level of potential ecological risk are high and dangerous in terms of agricultural or natural use of sediments, the percentage of metals has been recorded mainly in the immobile fraction from which they will not get into the soil.

Keywords: sewage sludge, geoaccumulation index (Igeo), potential ecological risk index (PERI), mobility of heavy metals

Streszczenie

Osady ściekowe z oczyszczalni ścieków mają istotne właściwości glebotwórcze i nawozowe. Nie zawsze jednak mogą być one wykorzystywane do tego celu. Jedną z głównych przyczyn, dla których nie można wykorzystać osadów na cele przyrodnicze, jest zawartość w nich metali ciężkich. Osady ściekowe z oczyszczalni w Starachowicach zostały poddane analizie potencjalnego zagrożenia metalami ciężkimi, zwłaszcza pod względem ich mobilności i geoakumulacji. Obliczenia wykonano dla stężeń metali ciężkich w osadach ściekowych pobranych z oczyszczalni w Starachowicach oraz w glebie ornej z punktu pomiarowego w miejscu ich potencjalnego wykorzystania. Obliczono wskaźnik geoakumulacji (Igeo) oraz potencjalny wskaźnik ryzyka ekologicznego (PERI). Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, iż pomimo że wskaźnik geokumulacji oraz poziom potencjalnego ryzyka ekologicznego są wysokie i niebezpieczne pod kątem rolniczego bądź przyrodniczego wykorzystania osadów, to udział procentowy metali odnotowano głównie we frakcji niemobilnej, z której nie będą one przedstawiać się do gleby.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, indeks geoakumulacji (Igeo), potencjalny indeks ryzyka ekologicznego (PERI), mobilność metali ciężkich

1. INTRODUCTION

Municipal sewage sludge is formed as a by-product of processes carried out at sewage treatment plants. At present, an increase in the amount of sewage sludge

1. WPROWADZENIE

Komunalne osady ściekowe powstają jako produkt uboczny procesów prowadzonych na oczyszczalni ścieków. Aktualnie można zaobserwować w Polsce,

generated can be observed in Poland as well as in the world [1]. There are many possibilities of utilization of the sludge created in this way. The form of natural sludge utilization is particularly beneficial, mainly due to its high fertilizer and soil-forming properties. The choice of sewage sludge management method is dictated especially by the number and properties of sewage sludge [2]. Moreover, it is subject to legal regulations, among others: In addition, it is subject to legal regulations, among others: the Waste Act [3], the Regulation of the Minister of the Environment on municipal sewage sludge [4], the Regulation of the Minister of Economy on criteria and procedures for allowing waste to be deposited at a given type of landfill site [5]. Sewage sludge, showing high fertilizer values, may be used in agriculture as an organic fertilizer, provided that the content of micro-pollutants does not cause negative effects in the soil environment [6]. The aim of this study was to assess the contamination and potential ecological risk of six selected heavy metals. In the assessment of potential ecological risks, GAI and PERI indicators were used and the mobility of heavy metals was taken into account. All tested indicators and heavy metals limits set by the Regulation were compared and appropriate conclusions were reached.

2. MOBILITY OF HEAVY METALS AND RISK INDICATORS FOR ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN SOIL

A two-kilogram sample of sewage sludge collected before the hygienization process from all the objects was used to investigate the mobility of metals. The determinations were performed with the Perkin-Elmer 3100 F-AAS atomic absorption spectrometer with a ball valve option. The investigations were carried out with the use of BCR sequential extraction method. Mineralisation of the residual fraction was carried out with the use of royal water. The collected sample was reduced to 8 g and dried (air-dry conditions) at 20°C for 48 hours. Then 0.5 g of sewage sludge with 80% hydration was weighed and transferred to a rotor tube per 100 cm³. After adding 40 cm³ of 0.11 molar acetic acid solution, the test was shaken for 16 hours at room temperature. The extract obtained was separated from the sediments by centrifugation (4000 rpm). The content of water-soluble metals in the obtained liquid was determined. The sewage sludge was washed with 20 cm³ of distilled water by shaking and centrifugation. Then 40 cm³ of 0.1 mol hydroxylamine hydrochloride solution with pH = 2

jak również na świecie wzrost ilości powstających osadów ściekowych [1]. Istnieje wiele możliwości zagospodarowania tak powstałych osadów. Szczególnie korzystna jest forma przyrodniczego wykorzystania osadów, głównie z uwagi na wysokie walory nawozowe, jak i glebotwórcze. Wybór metody zagospodarowania osadów ściekowych podyktowany jest szczególnie ilością i właściwościami osadów ściekowych [2]. Ponadto podlega regulacjom prawnym, między innymi: Ustawie o odpadach [3], Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych [4], Rozporządzeniu Ministra Gospodarki w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu [5]. Osady ściekowe, wykazując wysokie wartości nawozowe, mogą być wykorzystane w rolnictwie jako nawóz organiczny, pod warunkiem że zawartość mikrozanieczyszczeń nie wywoła negatywnych skutków w środowisku glebowym [6]. Badanie to miało na celu ocenę zanieczyszczenia i potencjalnego ryzyka ekologicznego sześciu wybranych metali ciężkich. W ocenie potencjalnego ryzyka ekologicznego wykorzystano wskaźniki GAI, PERI, a także uwzględniono mobilność metali ciężkich. Porównano wszystkie badane wskaźniki oraz limity zawartości metali ciężkich wyznaczone przez rozporządzenie, a następnie wyciągnięto odpowiednie wnioski.

2. MOBILNOŚĆ METALI CIĘŻKICH I WSKAŹNIKI RYZYKA KUMULACJI METALI CIĘŻKICH W GLEBIE

Do badań mobilności metali wykorzystano uprzednio pobraną dwukilogramową próbę osadów ściekowych przed procesem higienizacji ze wszystkich obiektów. Oznaczenia wykonano za pomocą spektrometru absorpcji atomowej firmy Perkin-Elmer 3100 F-AAS w opcji z zaworem kulowym. Badania przeprowadzono metodą ekstrakcji sekwencyjnej BCR. Mineralizację frakcji rezydualnej przeprowadzono przy pomocy wody królewskiej. Pobraną próbę zredukowano do masy 8 g i suszono (warunki powietrzno-suche) w temperaturze 20°C w czasie 48 godzin. Następnie odważono 0,5 g osadów ściekowych o uwodnieniu 80% i przeniesiono do próbówki wirnikowej na 100 cm³. Po dodaniu 40 cm³ 0,11-molowego roztworu kwasu octowego próbę wytrząsano 16 godzin w temperaturze pokojowej. Uzyskany ekstrakt oddzielono od osadów poprzez wirowanie (4000 obr./min). W otrzymanej cieczy oznaczono zawartość metali rozpuszczalnych w wodzie. Osady ściekowe przemyto 20 cm³ wody destylowanej poprzez wytrząsanie i wirowanie. Następnie do osadów ściekowych dodano 40 cm³ 0,1-mo-

was added to the sewage sludge. Nitric acid was used to adjust pH. The procedure was the same as in the previous stage (shaken and centrifuged) [11, 12]. In the liquid the metals of fraction II were determined and sewage sludge was washed away. Sewage sludge was transferred quantitatively to quartz evaporation chambers and 10 cm³ of 30% hydrogen peroxide was added. The content of the evaporator was heated in a water bath at 85°C for one hour. The activity was repeated by adding 8.8 molar solution of hydrogen peroxide to the sewage sludge (10 cm³). After cooling down to room temperature, the sewage sludge was transferred to rotor tubes and 50 cm³ of ammonium acetate solution (1 mol/dm³, pH = 2 after HNO₃ correction) was added. The sample was shaken for 16 hours and then the sediment was separated from the extract. Metals of fraction III were determined in the solution. Sewage sludge was washed and dried to constant weight. Mineralisation of the residual fraction was carried out with the participation of royal water. A conical flask with a volume of 300 cm³ containing 0.5 g of sewage sludge was mixed with 30 cm³ HCl and 10 cm³ HNO₃. The contents of the flask were heated for 30 minutes and then evaporated to dryness. After cooling, 25 cm³ HCl (1+5) was added to dissolve the sewage sludge and transferred to a volumetric flask and topped up with distilled water to 50 cm³, then the contents of the flask were mixed and filtered into a dry vessel. The metals of fraction IV were determined in the filtrate. Heavy metal content in the extracts obtained was determined according to ISO 9001:2000 on the Perkin-Elmer 3100 F-AAS atomic absorption spectrophotometer in four independent samples of sewage sludge. The recovery control was performed on the basis of certified reference material BCR CRM 143R. The results were analyzed statistically to exclude thick errors. Dixon and Grubbs tests were used for this purpose [11, 13].

2.1. Risk indicators for accumulation of heavy metals in soil

Geocumulation index of heavy metal in soil (GAI)

In order to assess the degree of accumulation of heavy metals of anthropogenic origin in the soil, the Geocumulation Index (GAI) is used, which is described in equation [14, 15]:

$$GAI = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n} \quad (1)$$

lowego roztworu chlorowodoru hydroksyloaminy o pH = 2. Do korekty pH wykorzystano kwas azotowy. Postępowano jak w poprzednim etapie (wytrząsano i wirowano) [11, 12]. W cieczy oznaczono metale frakcji II, a osady ściekowe przepłukano. Osady ściekowe przeniesiono ilościowo do parownic kwarcowych i dodano 10 cm³ 30% nadtlenu wodoru. Zawartość parownicy ogrzewano w łaźni wodnej w temperaturze 85°C w ciągu jednej godziny. Czynność powtórzono dodając do osadów ściekowych 10 cm³ 8,8-molowego roztworu nadtlenu wodoru. Po ochłodzeniu do temperatury pokojowej próby osadów ściekowych przeniesiono do probówek wirnikowych, po czym dodano 50 cm³ roztworu octanu amonu (1 mol/dm³, pH = 2 po korekcie HNO₃). Wytrząsano próbę 16 godzin, a następnie oddzielono osady od ekstraktu. W roztworze oznaczono metale frakcji III. Osady ściekowe przemyto i wysuszono do stałej masy. Mineralizację frakcji rezydualnej przeprowadzono z udziałem wody królewskiej. Do kolby stożkowej o objętości 300 cm³ zawierającej 0,5 g osadów ściekowych, dodano 30 cm³ stęż. HCl i 10 cm³ stęż. HNO₃. Zawartość kolby ogrzewano przez 30 minut, następnie odparowano do sucha. Po ochłodzeniu dodano 25 cm³ HCl (1+5) w celu rozpuszczenia osadów ściekowych i przeniesiono do kolby miarowej i uzupełniono wodą destylowaną do 50 cm³, następnie wymieszano i przesączono zawartość kolby do suchego naczynia. W przesączu oznaczono metale frakcji IV. Zawartość metali ciężkich w uzyskanych ekstraktach oznaczono zgodnie z ISO 9001:2000 na spektrofotometrze absorpcji atomowej Perkin-Elmer 3100 F-AAS, w czterech niezależnych próbkach osadów ściekowych. Kontrolę odzysku przeprowadzono w oparciu o certyfikowany materiał odniesienia BCR CRM 143R. Wyniki badań poddano analizie statystycznej celem wykluczenia błędów grubych. Wykorzystano w tym celu testy Dixona oraz Grubbsa [11, 13].

2.1. Wskaźniki ryzyka kumulacji metali ciężkich w glebie

Wskaźnik geokumulacji metalu ciężkiego w glebie (GAI)

W celu oceny stopnia kumulowania się w glebie metali ciężki pochodzenia antropogenicznego, stosuje się wskaźnik geokumulacji (GAI), który opisany jest równaniem [14, 15]:

$$GAI = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n} \quad (1)$$

where:

C_n – content of a given element from the group of heavy metals contained in sewage sludge, mg/kg d.m.

B_n – content of a given element from the group of heavy metals present in the soil, mg/kg d.m.

Table 1 presents the classification of the heavy metals geocumulation index.

GAI index	Level of geocumulation of heavy metals
< 0	No pollution
0 - 1	No pollution, moderate pollution
1 - 2	Moderate pollution
2 - 3	Moderate pollution or high
3 - 4	High pollution
4 - 5	High or very high pollution
> 5	Very high pollution

Potential Environmental Risk Indicator (PERI)

The Potential Environmental Risk Index (PERI) is a measure of the environmental risk of soil with heavy metals and is described in the following formulas [14, 16]:

$$C_f^i = \frac{C_D^i}{C_R^i} \quad (2)$$

where:

C_f^i – pollution factor,

C_D^i – concentration of the i -th element from the group of heavy metals present in sewage sludge, mg/kg d.m.

C_R^i – concentration of the i -th element from the group of heavy metals in the soil, mg/kg.

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (3)$$

where:

E_r^i – indicator of the potential ecological risk of the i -th element from the group of heavy metals,

T_r^i – toxicity factor of the i -th element from the group of heavy metals.

Heavy metals differ in the degree of toxicity, which takes into account the toxicity factor (T_r^i): lead –5, cadmium –30, chromium –2, copper –5, nickel –5, zinc –1 [15].

The sum of indicators of potential ecological risk of heavy metals from sewage sludge in the ground is defined by the equation [15]:

gdzie:

C_n – zawartość danego pierwiastka z grupy metali ciężkich znajdującego się w osadach ściekowych, mg/kg s.m.

B_n – zawartość danego pierwiastka z grupy metali ciężkich znajdującego się w glebie, mg/kg s.m.

W tabeli 1 przedstawiono klasyfikację wskaźnika geokumulacji metali ciężkich.

Table 1. Classification of geocumulation index of heavy metals in soil [15]

Tabela 1. Klasyfikacja wskaźnika geokumulacji metali ciężkich w glebie [15]

Wskaźnik potencjalnego ryzyka ekologicznego (PERI)

Wskaźnik potencjalnego ryzyka ekologicznego (PERI) jest miarą zagrożenia ekologicznego gruntu metalami ciężkimi i opisany jest następującymi formułami [14, 16]:

$$C_f^i = \frac{C_D^i}{C_R^i} \quad (2)$$

gdzie:

C_f^i – współczynnik zanieczyszczenia,

C_D^i – stężenie i -tego pierwiastka z grupy metali ciężkich znajdującego się w osadach ściekowych, mg/kg s.m.,

C_R^i – stężenie i -tego pierwiastka z grupy metali ciężkich znajdującego w glebie, mg/kg

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (3)$$

gdzie:

E_r^i – wskaźnik potencjalnego ryzyka ekologicznego i -tego pierwiastka z grupy metali ciężkich,

T_r^i – współczynnik toksyczności i -tego pierwiastka z grupy metali ciężkich.

Metale ciężkie różnią się stopniem toksyczności, co uwzględnia współczynnik toksyczności (T_r^i): ołów –5, kadm –30, chrom –2, miedź –5, nikiel –5, cynk –1 [15].

Suma wskaźników potencjalnego ryzyka ekologicznego metali ciężkich z osadów ściekowych w gruncie jest definiowana równaniem [15]:

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (4)$$

Table 2 shows the degree of potential environmental risk in relation to the PERI value.

E_r^i	PERI	Potential environmental risk
< 40	< 150	Low
40 - 80	150 - 300	Medium
80 - 320	300 - 600	High
> 320	> 600	Very high

3. MATERIALS AND METHODS

Samples of sewage sludge taken from the sewage treatment plant in Starachowice in the *Świętokrzyskie* Voivodeship were used for the studies. The characteristics of the sewage treatment plant are presented in Table 4. A measurement point prepared by the Monitoring of Orne Soil Chemistry in Poland [8] was used as a comparison point of heavy metals content in soil, and a measurement point in Wąchock, the closest to the OŚ in Starachowice, was selected. The results of soil measurement tests are presented in Tables 5 and 6. The sewage sludge collected from the sewage treatment plants under study mostly met the requirements of heavy metals content included in the regulation. Only the level of zinc was slightly higher than provided for in the regulation. The limits of heavy metals in terms of the use of sewage sludge in Poland and worldwide are presented in Table 3.

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (4)$$

W tabeli 2 przedstawiono stopień potencjalnego ryzyka zagrożenia ekologicznego w stosunku do wartości wskaźnika PERI.

Table 2. Interpretation of the potential environmental risk indicator value

Tabela 2. Interpretacja wartości wskaźnika potencjalnego ryzyka ekologicznego

3. MATERIAŁY I METODY

Do badań wykorzystano próbki osadów ściekowych pobranych z oczyszczalni ścieków w Starachowicach na terenie województwa świętokrzyskiego. Charakterystykę oczyszczalni przedstawiono w tabeli 4. Jako punkt porównawczy zawartości metali ciężkich w glebie wykorzystano punkt pomiarowy sporządzony przez Monitoring Chemizmu Gleb Ornych w Polsce [8], wybrano punkt pomiarowy w Wąchocku, znajdujący się najbliżej OŚ w Starachowicach. Wyniki prób pomiarowych gleb przedstawiono w tabelach 5 i 6. Osady ściekowe pobrane z badanych oczyszczalni w większości spełniały wymogi zawartości metali ciężkich zawarte w rozporządzeniu. Jedynie poziom cynku był nieznacznie wyższy, niż przewiduje to rozporządzenie. Limity metali ciężkich w aspekcie wykorzystania osadów ściekowych w Polsce oraz na świecie przedstawiono w tabeli 3.

Table 3. Normative limit values for heavy metals in sewage sludge for agricultural use [7]

Tabela 3. Normatywne wartości graniczne metali ciężkich w osadach ściekowych przeznaczonych do użytku w rolnictwie [7]

Metal	Permissible values for heavy metals intended for natural use					
	Poland Regulation	EU Directive 86/278/EEC	Chinese Regulation GB 18918-2002		USA Regulation 40 CFR Part 503, 503.13	South African Guideline (Pollutant Class a)
Region			pH<6.5	pH>6.5		
Cd	20	20-40	5	20	39	40
Ni	300	300-400	100	200	420	420
Zn	2500	2500-4000	500	1000	2800	2800
Cu	1000	1000-1750	250	500	1500	1500
Cr	500	–	600	1000	–	1200
Pb	750	750-1200	300	1000	300	300

Table 4. Characteristics of analysed sewage treatment plants [9]

Tabela 4. Charakterystyka analizowanych oczyszczalni ścieków [9]

Location	Treatment plant type	RLM	Sludge treatment form	Location of potential use of sewage sludge	Distance of the WWTP from the point of potential use (km)
Starachowice	Mechanical-biological	95000	Fermentation in WKF	Wąchock	7.6

Heavy metal	Value at the measuring point
Cu	3.0
Cr	3.3
Cd	0.09
Ni	2.4
Pb	10.8
Zn	19.3

Table 5. Characteristics of analysed points of potential sewage sludge utilisation [10]

Tabela 5. Charakterystyka analizowanych punktów potencjalnego wykorzystania osadów ściekowych [10]

Table 6. Contents of a given element from the group of heavy metals in soils of agricultural land in Świętokrzyskie voivodship, mg/kg d.m. [10].

Tabela 6. Zawartość danego pierwiastka z grupy metali ciężkich w glebach użytków rolnych województwa świętokrzyskiego, mg/kg s.m. [10]

Location	Soil type	Bonitation class	Complex	Soil species	pH (H ₂ O)	Caries [%]	Organic carbon [%]	Total nitrogen	C/N ratio
Wąchock/Wąchock/ Świętokrzyskie	Deer soils	IVa	5 (rye good)	Clay sand	4.1	0.99	0.57	0.08	7.2

The content of heavy metals from the analysed wastewater treatment plant is presented in Table 7.

Zawartość metali ciężkich pochodzących z analizowanej oczyszczalni ścieków przedstawiono w tabeli 7.

Table 7. Heavy metal content in sludge from the tested sewage treatment plant [8]

Tabela 7. Wyniki badań zawartości metali ciężki w osadach pochodzących z badanej oczyszczalni ścieków [8]

WWTP	Chromium, mg/kg	Zinc, mg/kg	Cadmium, mg/kg	Copper, mg/kg	Nickel, mg/kg	Lead, mg/kg
Starachowice	142.6	2777.0	2.4	196.0	43.9	56.8

4. RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

Table 8 presents the level of heavy metals geocumulation in the agricultural soil of Świętokrzyskie Voivodeship from sewage sludge from the analysed sewage treatment plant.

4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

W tabeli 8 przedstawiono poziom geokumulacji metali ciężkich w glebie rolnej województwa świętokrzyskiego z osadów ściekowych pochodzących z analizowanej oczyszczalni ścieków.

Table 8. Classification of the results of the heavy metals geocumulation index from sewage sludge in soil

Tabela 8. Klasyfikacja wyników wskaźnika geokumulacji metali ciężkich z osadów ściekowych w glebie

Wastewater treatment plant 01				
Heavy Metal	Sample			Level of geocumulation
	Cn, mg/kg s.m.	Bn, mg/kg s.m.	GAI	
Pb	56.8	10.8	1.81	Medium pollution
Cd	2.4	0.09	4.15	High or very high pollution
Cr	142.6	3.3	4.85	High or very high pollution
Cu	196.0	3.0	5.44	Very high pollution
Ni	43.9	2.4	3.61	High pollution
Zn	2777.0	19.3	6.58	Very high pollution

Analysing the level of geocumulation of heavy metals in soil, it can be concluded that the dominant heavy metals causing high contamination are Copper, Cadmium, Chromium, and Zinc, while statistically the lowest risk of accumulation in soil is posed by Lead. However, in most cases the results are not satisfactory and a very high risk of heavy metals geocumulation dominates, despite the fact that sewage sludge from the examined plants meets the requirements of the permissible content of heavy metals for agricultural purposes according to the Regulation of the Minister of the Environment of 6 February 2015.

Table 9 presents the collective values of the potential environmental risk index for individual heavy metals from the sewage sludge.

Analizując poziom wskaźnika geokumulacji metali ciężkich w glebie, można stwierdzić, że dominującymi metalami ciężkimi powodującymi wysokie zanieczyszczenie są miedź, kadm, chrom, oraz cynk, natomiast statystycznie najmniejsze ryzyko akumulacji w glebie stwarza ołów. Jednakże w większości wyniki nie są zadowalające i dominuje bardzo wysokie zagrożenie geokumulacji metali ciężkich, pomimo, że osady ściekowe pochodzące z badanych oczyszczalni spełniają warunki dopuszczalnej zawartości metali ciężkich na cele rolnicze według rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r.

W tabeli 9 przedstawiono zbiorczą wartość wskaźnika potencjalnego ryzyka ekologicznego dla poszczególnych metali ciężkich pochodzących z badanych osadów ściekowych.

Table 9. Classification of the results of the potential environmental risk indicator

Tabela 9. Klasyfikacja wyników wskaźnika potencjalnego ryzyka ekologicznego

WWTP Starachowice						
Heavy Metal	Sample					Level of potential environmental risks
	C_p , mg/kg s.m.	C_R , mg/kg	C_f	T_f	E_f	
Pb	56.80	10.80	5.26	5.00	26.30	Low
Cd	2.40	0.09	26.67	30.00	800.00	Very high
Cr	142.60	3.30	43.21	2.00	86.42	High
Cu	196.00	3.00	65.33	5.00	326.67	Very high
Ni	43.90	2.40	18.29	5.00	91.46	Medium
Zn	2777.00	19.30	143.89	1.00	143.89	High

When analysing the results of the potential ecological risk indicator, it can be concluded that the only element of the heavy metal group which does not show any potential ecological risk is lead. The remaining elements pose a high risk of ecological pollution, the most toxic of which is cadmium.

Heavy metal stability

Table 10 presents the average heavy metals content in the dry matter of the sludge in four stability fractions obtained by sequential extraction of BCR. In most cases, the level of stability of the metals does not indicate a high environmental risk. This is due to the high content of heavy metals in stable fractions (F3 and F4).

Analizując wyniki wskaźnika potencjalnego ryzyka ekologicznego, można stwierdzić, że jedynym pierwiastkiem z grupy metali ciężkich, który nie wykazuje potencjalnego ryzyka zagrożenie ekologiczne jest ołów. Pozostałe pierwiastki stwarzają w większości wysokie ryzyko skażenia ekologicznego, wśród nich najbardziej toksyczny okazał się kadm.

Stabilność metali ciężkich

W tabeli 10 przedstawiono średnią zawartość metali ciężkich w suchej masie osadu w czterech frakcjach stabilności uzyskanych metodą ekstrakcji sekwencyjnej BCR.

W większości przypadków poziom stabilności metali nie wskazuje na wysokie zagrożenie ekologiczne. Spowodowane jest to wysokim udziałem zawartości metali ciężkich we frakcjach stabilnych (F3 oraz F4).

Table 10. Average content of heavy metals in dry mass of sludge from the sewage treatment plant in Starachowice in four stability fractions obtained by BCR sequential extraction method

Tabela 10. Średnią zawartość metali ciężkich w suchej masie osadu z oczyszczalni w Starachowicach w czterech frakcjach stabilności uzyskanych metodą ekstrakcji sekwencyjnej BCR

Heavy Metal [mg/kg s.m.]	Cu	Cr	Cd	Ni	Pb	Zn
Fraction I	0.9	2.1	0.1	7.9	7.8	79.0
Fraction II	1.2	0.9	0.3	3.2	1.0	275.0
Fraction III	124	78.1	0.9	9.8	4.5	1491.0
Fraction IV	69.9	61.5	1.1	23.0	43.5	932.0

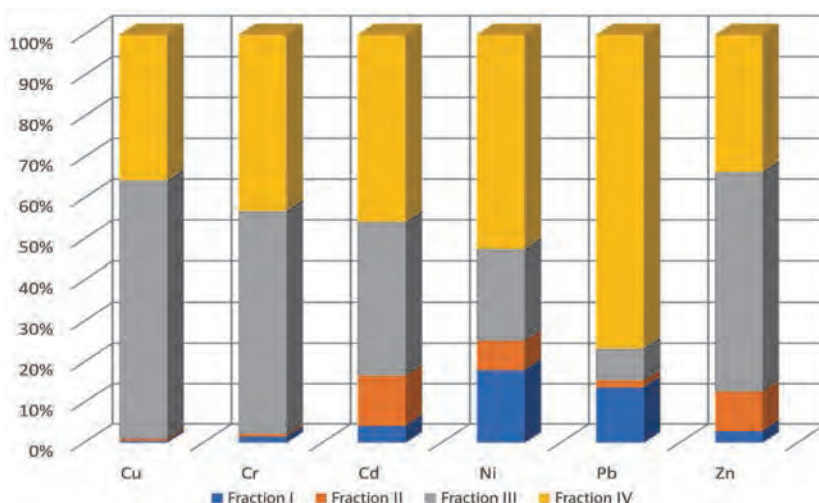


Fig. 1. Average percentage share of heavy metals in sewage sludge from the Starachowice treatment plant depending on the fraction

Rys. 1. Średni udział procentowy metali ciężkich w osadach ściekowych pochodzących z oczyszczalni Starachowice w zależności od frakcji

5. CONCLUSIONS

The analysis of sewage sludge in terms of soil geocumulation index showed a very high risk of ecological contamination with heavy metals, mainly Copper, Cadmium, Chromium and Zinc. The calculated level of potential ecological risk also shows that for sewage sludge from the treatment plant in Starachowice and the soil sample used in the calculations, the risk of contamination with heavy metals is very high. This is due to the high values of the potential environmental risk index for Cadmium, Copper and Zinc. On the other hand, the sediment stability analysis showed a negligible share of cadmium, copper and zinc in the mobile fraction from which metals can migrate to the soil.

On the basis of the analysis of the results it can be concluded that although the geocumulation index and the level of potential ecological risk are high and dangerous for the agricultural or natural use of sediments, the percentage of metals was recorded mainly in the immobile fraction, from which they will not penetrate the soil.

5. WNIOSKI

Analiza osadów ściekowych pod kątem wskaźnika geokumulacji w glebie wykazała bardzo duże ryzyko skażenia ekologicznego metalami ciężkimi, głównie miedź, kadm, chrom oraz cynk. Również z obliczonego poziomu potencjalnego ryzyka ekologicznego wynika, że dla osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni w Starachowicach oraz przyjętej do obliczeń próbki gruntu ryzyko zanieczyszczenia metalami ciężkimi jest na bardzo wysokim poziomie. Wpływ na to mają wysokie wartości wskaźnika potencjalnego ryzyka ekologicznego dla kadmu, miedzi oraz cynku. Natomiast analiza osadu pod kątem stabilności wykazała znikomy udział kadmu, miedzi oraz cynku w frakcji mobilnej, z której metale mogą migrować do gleby.

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, iż pomimo że wskaźnik geokumulacji oraz poziom potencjalnego ryzyka ekologicznego są wysokie i niebezpieczne pod kątem rolniczego bądź przyrodniczego wykorzystania osadów, to udział procentowy

Differences in the obtained results result from the fact that GAI and PERI indicators determine the sensitivity of the examined environment to heavy metals and show the risk resulting not only from concentrations of metals in sewage sludge, but also from their presence in the ground. Furthermore, PERI takes into account the toxicity of heavy metals. The BCR sequential extraction method, on the other hand, focuses on the assessment of heavy metal mobility. Despite the differences in results, the determination of these indicators should be integrated in order to comprehensively assess the quality of the environment and to analyse the risk of accumulation of heavy metals in soils.

REFERENCES

- [1] Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2014, Uchwała Nr 217 Rady Ministrów, z dnia 24 grudnia 2010 r., Monitor Polski, nr 101, poz. 1183.
- [2] Latosińska Jolanta, *Analiza mobilności metali ciężkich z osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków w Olsztynie i Sitkówce-Nowiny*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2014, t. 17, nr 2, s. 243-253.
- [3] Ustawa o odpadach, DzU 2013, poz. 21.
- [4] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych, DzU 2010, Nr 137, poz. 924.
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu, DzU 2013, poz. 38.
- [6] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 roku w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu, DzU 2008, Nr 119, poz. 765.
- [7] McGrath et al., 2000; Nilsson and Dahlström, 2005.
- [8] <http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-jakosci-gleby-i-ziemi>
- [9] Gawdzik Jarosław: *Mobilność wybranych metali ciężkich w osadach ściekowych*. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2013.
- [10] https://www.gios.gov.pl/chemizm_gleb/index.php?mod=pomiary&w=26
- [11] Gawdzik Jarosław: *Mobilność metali ciężkich w osadach ściekowych na przykładzie wybranej oczyszczalni ścieków*. Inżynieria i Ochrona Środowiska 2012, t 15, nr 1, ss. 5-15.
- [12] PN-EN ISO 11885:2009. Jakość wody – Oznaczanie wybranych pierwiastków metodą optycznej spektrometrii emisyjnej z plazmą wzbudzoną indukcyjnie.
- [13] Żelezik Monika, Gawdzik Jarosław: *The content of heavy metals species in sewage sludge from wastewater treatment plants in Mniów*. Archives of Waste Water Management and Environmental Protection. 2015, nr 17, ss. 119-126.
- [14] Hakanson Lars: *An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach*. Water Research 1980, 14, ss. 975–1101.
- [15] Xiao Zhihua, Yuan Xing-Zhong, Leng Lijian, Jiang Longbo, Chen Xiaohong, Zhibin Wu, Xin Peng, Jiachao Zhang, Zeng Guangming: *Risk assessment of heavy metals from combustion of pelletized municipal sewage sludge*, Environmental Science Pollution Research, 2015.
- [16] Czaplicka Anna, Ślusarczyk Zbigniew, Szarek-Gwiazda Ewa, Bazan Sonia: *Rozkład przestrzenny związków żelaza i manganu w osadach dennych Jeziora Goczałkowickiego*. Ochrona Środowiska 2017, vol. 39, nr 3, ss. 47-54.
- [17] Zhang Jian, Tian Yu, Zhang Jun, Li Ning, Kong Lingchao, Yu Ming: *Distribution and risk assessment of heavy metals in sewage sludge after ozonation*. Environ. Sci. Pollut. Res. 24: 5118-5125, 2017.
- [18] Singh Jiwan., Lee Byeong-Kyu: *Reduction of environmental availability and ecological risk of heavy metals in automobile shredder residues*. Ecol Eng 81:76–81 2015.

Acknowledgments:

The work was financed by Kielce University of Technology and Jan Kochanowski University in Kielce

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską, Wydział Budownictwa i Architektury oraz Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach

PROPERTIES OF CEMENT MORTARS MODIFIED
WITH COMMERCIAL NANOSILICA
WŁAŚCIWOŚCI ZAPRAW CEMENTOWYCH MODYFIKOWANYCH
NANOKRZEMIONKĄ KOMERCYJNĄ

Structure and Environment No. 4/2019, vol. 11, p. 247

DOI: 10.30540/sae-2019-018

Abstract

Nanosilica as a commercial product dedicated to construction remains a relatively expensive chemical admixture for concrete and cement mortars. Economic considerations are a major barrier to the industrial use of nanosilica in the building materials industry. With respect to nanosilica, the following have been confirmed: accelerating the effect of C_3S hydration, accelerated C-S-H gel formation, modification of the mixture viscosity, improvement of cement matrix tightness, also at high temperature. The efficiency of nanosilica depends on its even distribution in the composite, therefore disagglomeration is necessary for the proper design of mortar or concrete. The article presents the results of tests on cement mortars modified with different amounts of colloidal nanosilica. It is an nano- SiO_2 admixture in the form of an aqueous dispersion containing up to 50% pure nanosilica, which is produced on an industrial scale as an admixture for concrete and cement mortars. Dispersions of nanosilica in composite using ultrasound were used. The possibilities of using nanosilica as an admixture improving the early strength of cement composites were pointed out.

Streszczenie

Nanokrzemionka jako produkt komercyjny dedykowany dla budownictwa pozostaje nadal stosunkowo drogą domieszką chemiczną do betonów i zapraw cementowych. Względędy ekonomiczne są główną barierą w przemysłowym zastosowaniu nanokrzemionki w przemyśle materiałów budowlanych. W odniesieniu do nanokrzemionki potwierdzono: przyspieszające działanie na hydratację C_3S , przyspieszone tworzenie się żelu C-S-H, modyfikację lepkości mieszanki, poprawę szczelności matrycy cementowej, także w warunkach wysokiej temperatury. Wydajność nanokrzemionki zależy od jej równomiernego rozmieszczenia w kompozycie, dlatego dezaglomeracja jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania zaprawy lub betonu. W artykule przedstawiono wyniki badań zapraw cementowych modyfikowanych różną ilością nanokrzemionki koloidalnej. Jest to domieszka nano- SiO_2 w postaci wodnej dyspersji zawierającej do 50% czystej nanokrzemionki, która produkowana jest na skalę przemysłową jako domieszka do betonów i zapraw cementowych. W badaniach zastosowano dyspersję nanokrzemionki w kompozycie z wykorzystaniem ultradźwięków. Wskazano na możliwości zastosowania nanokrzemionki jako domieszki poprawiającej wczesną wytrzymałość kompozytów cementowych.

STUDY OF RUBBER GRANULES IMPACT ON SELECTED MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT MORTARS

BADANIE WPŁYWU GRANULATU GUMOWEGO NA KSZTAŁTOWANIE WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ZAPRAW CEMENTOWYCH

Structure and Environment No. 4/2019, vol. 11, p. 256

DOI: 10.30540/sae-2019-019

Abstract

The ground rubber waste material from used vehicle tyres is used in road construction as well as in the cement industry. The use of granules in an amount of 5% causes a decrease in strength by about 25%. Replacement of 15% of cement by rubber waste is causing the reduction of strength by nearly 50%. The research of the microstructure of mortars with rubber granules indicates the proper hydration reaction. Observation under scanning electron microscope of mortar with ground rubber waste has shown presence of C-S-H phase and portlandite. The presence of additional, porous zones of contact between the granulate and cement paste was also found.

Streszczenie

Rozdrobnione odpady gumowe z zużytych opon samochodowych znajdują zastosowanie w budownictwie drogowym, jak również przemyśle cementowym. Artykuł prezentuje wykorzystanie odpadów gumowych do modyfikacji zapraw cementowych. Zastosowanie granulatu w ilości 5% powoduje spadek wytrzymałości o około 20%. Zastąpienie cementu 15% odpadu gumowego przyczynia się do obniżenie wytrzymałości o blisko 50%. Badania mikrostruktury zapraw z granulem gumowym wskazują na prawidłowy przebieg procesu hydratacji. Pod skaningowym mikroskopem elektronowym obserwuje się włóknistą fazę C-S-H oraz portlandyt. Stwierdzono również obecność dodatkowych, porowatych stref kontaktu granulatu z zaczynem.

MAŁGORZATA LINEK
MARIUSZ WESOŁOWSKI

**SELECTED ASPECTS OF EVALUATING THE TECHNICAL CONDITION OF CONCRETE AIRPORT
PAVEMENTS IN TERMS OF SERVICE LIFE**

**WYBRANE ASPEKTY OCENY STANU TECHNICZNEGO BETONOWYCH NAWIERZCHNI
LOTNISKOWYCH W UJĘCIU TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ**

Structure and Environment No. 4/2019, vol. 11, p. 265

DOI: 10.30540/sae-2019-020

Abstract

The paper presents the essence of airport pavements' durability in terms of its condition's evaluation. It features a discussion of selected research methods for the most important pavement parameters. It was proposed to expand the existing pavement condition evaluation process with selected verification methods. The use of geo-radar measurements in connection with the specification of the pavement concrete's durability and concrete pavement's internal structure analysis seems to be a necessary element supplementing the currently used evaluation procedure.

Streszczenie

W artykule przedstawiono istotę trwałości nawierzchni lotniskowych w kontekście oceny stanu nawierzchni. W ramach rozważań omówiono wybrane metody badawcze dla najważniejszych parametrów nawierzchniowych. Zaproponowano rozszerzenie istniejącego procesu oceny stanu nawierzchni o wybrane metody weryfikacyjne. Wykorzystanie pomiarów georadarowych w powiązaniu z określeniem wytrzymałości betonu w nawierzchni i analizą struktury wewnętrznej kompozytu betonowego wydaje się nieodzownym elementem uzupełniającym stosowaną obecnie procedurę oceny.

PRELIMINARY TEST RESULTS OF THERMAL COMFORT IN A CLASSROOM

WSTĘPNE WYNIKI BADAŃ KOMFORTU CIEPLNEGO W SALI LEKCYJNEJ

Structure and Environment No. 4/2019, vol. 11, p. 281

DOI: 10.30540/sae-2019-021

Abstract

The paper presents the issue of thermal comfort based on the conducted study. First, the definition and importance of thermal comfort was discussed. Then, air parameters were measured and surveys were conducted regarding questions about the assessment of thermal comfort of persons using the room. The list of the subject thermal comfort evaluation tests are illustrated in the diagrams. The impact of gender and BMI on the Predicted Mean Vote PMV were also analyzed. In the next part, results obtained from surveys and according to formulas from the standard were developed, and then compared.

Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienie komfortu cieplnego w oparciu o przeprowadzone badanie. Najpierw omówiono definicję i znaczenie komfortu cieplnego. Następnie wykonano pomiary parametrów powietrza oraz przeprowadzono ankiety dotyczące pytań o ocenę komfortu cieplnego osób użytkujących pomieszczenie. Zestawienia badań oceny komfortu cieplnego zilustrowano na wykresach. Analizie poddano także wpływ płci i wskaźnika BMI na przewidywaną średnią ocenę PMV. W kolejnej części opracowano wyniki otrzymane z ankiet oraz według wzorów z normy, a następnie je porównano.

ROBERT KOWALIK
JAROSŁAW GAWDZIK
BARBARA GAWDZIK

RISK ANALYSIS OF ACCUMULATION OF HEAVY METALS FROM SEWAGE SLUDGE IN SOIL FROM THE SEWAGE TREATMENT PLANT IN STARACHOWICE

ANALIZA RYZYKA KUMULACJI METALI CIĘŻKICH Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH W GLEBIE POCHODZĄCYCH Z OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W STARACHOWICACH

Structure and Environment No. 4/2019, vol. 11, p. 287

DOI: 10.30540/sae-2019-022

Abstract

Sewage sludge from sewage treatment plants has important soil-forming and fertilizing properties. However, they cannot always be used for this purpose. One of the main reasons why sludge cannot be used for natural purposes is its heavy metal content. Sewage sludge from the treatment plant in Starachowice has been subjected to an analysis of the potential risk of heavy metals, especially in terms of their mobility and geoaccumulation. The calculations were made for the concentrations of heavy metals in sewage sludge taken from the treatment plant in Starachowice and in arable soil from the measurement point at the place of its potential use. Geoaccumulation index (*I_{geo}*) and potential ecological risk index (*PERI*) were calculated. The analysis of the results shows that although the geo-accumulation index and the level of potential ecological risk are high and dangerous in terms of agricultural or natural use of sediments, the percentage of metals has been recorded mainly in the immobile fraction from which they will not get into the soil.

Streszczenie

Osady ściekowe z oczyszczalni ścieków mają istotne właściwości glebotwórcze i nawozowe. Nie zawsze jednak mogą być one wykorzystywane do tego celu. Jedną z głównych przyczyn, dla których nie można wykorzystać osadów na cele przyrodnicze, jest zawartość w nich metali ciężkich. Osady ściekowe z oczyszczalni w Starachowicach zostały poddane analizie potencjalnego zagrożenia metalami ciężkimi, zwłaszcza pod względem ich mobilności i geoakumulacji. Obliczenia wykonano dla stężeń metali ciężkich w osadach ściekowych pobranych z oczyszczalni w Starachowicach oraz w glebie ornej z punktu pomiarowego w miejscu ich potencjalnego wykorzystania. Obliczono wskaźnik geoakumulacji (*I_{geo}*) oraz potencjalny wskaźnik ryzyka ekologicznego (*PERI*). Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, iż pomimo że wskaźnik geokumulacji oraz poziom potencjalnego ryzyka ekologicznego są wysokie i niebezpieczne pod kątem rolniczego bądź przyrodniczego wykorzystania osadów, to udział procentowy metali odnotowano głównie we frakcji niemobilnej, z której nie będą one przedostawać się do gleby.

Uniform requirements for manuscripts submitted to “Structure and Environment”

All manuscripts should be submitted in English and Polish.

Given name(s) and surname(s) of each author

Institutional affiliation(s)

Author's e-mail

Title

Format for the paper:

- Abstract
- Keywords
- Introduction
- Subsequent headings
- Summary
- References

The text should be single-spaced throughout. The font should be 11 pt Times New Roman. All paragraphs should be indented 0.5 cm.

Formulas, tables, figures and photographs should be numbered consecutively

Figures and photographs with a resolution of 300 dpi or higher must be submitted in *.TIFF, *.EPS, *.JPG, *.WMF format.

Figures, photographs and tables should be in English, but their captions should be given in English and Polish.

References: The paper submitted for publication must comply with copyright law provisions. Authors have to document sources of the photographs, figures, quotes and borrowings used in the article. References should be cited in square brackets through the text. The full list of references arranged in the citing order as they appear in the text should be placed at the end of the paper (with one language version only). The reference style is defined by the standard PN-ISO 690:2012 Information and documentation. Guidelines for bibliographic references and citations to information resources.

Examples

Whole books

- [1] Author's surname followed by the initials: Title of the book. Place of publication: Publisher, Year of publication, ISBN number.

Edited books

- [2] Surname and initials of the editor (Ed.): Title of the book. Place of publication: Publisher, Year of publication, ISBN number.

Chapters in edited books

- [3] Author's surname followed by the initials: Title of the chapter. (in): Title of the book. Place of publication: Publisher, Year of publication, page numbers (for example: pp. 10-20), ISBN number.

Journal articles

- [4] Author's surname followed by the initials: Title of the article. "journal title" Year, Number, page numbers (for example: pp. 10-20), ISSN number

Web references

- [5] Author's surname followed by the initials: Title of the work. [type of the source, for example: online]. [date when the reference was last Accessed: ...]. Available online: web page

Podstawowe wymagania edytorskie dotyczące pisania artykułów do czasopisma „Structure and Environment”

Artykuł powinien być napisany w dwóch wersjach językowych: angielskiej oraz polskiej.

Imię i nazwisko autora
Nazwa uczelni
e-mail autora

Tytuł artykułu

Struktura artykułu:

- Streszczenie
- Słowa kluczowe
- Wprowadzenie
- Kolejne podtytuły
- Podsumowanie
- Bibliografia

Tekst artykułu powinien być napisany czcionką Times New Roman 11, interlinia pojedyncza, wcięcie akapitowe 0,5 cm.

Wzory, tabele, rysunki oraz zdjęcia powinny być ponumerowane zgodnie z kolejnością ich występowania w tekście.

Rysunki oraz zdjęcia o rozdzielczości 300 dpi lub wyższej, format *.TIFF, *.EPS, *.JPG, *.WMF.

Rysunki, zdjęcia oraz tabele zamieszczamy w wersji angielskiej, a ich tytuły podajemy zarówno w języku angielskim, jak i języku polskim.

Bibliografia: Artykuł przeznaczony do publikacji musi być przygotowany zgodnie z postanowieniami ustawy „Prawo autorskie”, które nakłada na autora obowiązek wykazania źródeł wykorzystanych zdjęć, rysunków cytowań, zapożyczeń. Źródła takie należy umieszczać w tekście w nawiasach kwadratowych. Zbiorcze zestawienie bibliografii umieszczamy na końcu artykułu w kolejności cytowania (tylko przy jednej wersji językowej).

Styl bibliograficzny definiuje norma: **PN-ISO 690:2012** *Informacja i dokumentacja. Wytyczne opracowania przypisów bibliograficznych i powołań na zasoby informacji*.

Przykłady

Pozycje książkowe

[1] Nazwisko i inicjały imion autora: *Tytuł: podtytuł*. Miejsce wydania: Wydawca, Rok, Numer ISBN.

Praca zbiorowa

[2] Nazwisko i inicjały imion redaktora (red): *Tytuł: podtytuł*. Miejsce wydania: Wydawca, Rok, Numer ISBN.

Rozdziały książek

[3] Nazwisko i inicjały imion autora: *Tytuł: podtytuł rozdziału*. [w]: *Tytuł publikacji*. Miejsce wydania: Wydawca, Rok, Strony (np. s. 10-20), Numer ISBN.

Artykuły w czasopismach

[4] Nazwisko i inicjały imion autora: *Tytuł artykułu*. „Tytuł czasopisma” Rok, Numer, Strony (np. s. 8-27), Numer ISSN.

Strony internetowe

[5] Nazwisko i inicjały imion autora: *Tytuł*. [typ nośnika (np. online)]. [data dostępu: ...]. Dostępny w internecie: Adres strony internetowej

THE REVIEW PROCESS

The following requirements need to be met by the paper:

- the title should reflect the content of the paper
- the content should be within the thematic scope of the journal
- the paper should be properly and clearly divided into paragraphs
- original elements need to be part of the paper
- the research method should be properly selected
- adequate references need to be cited
- interpretation and conclusions should match the presented test results
- the paper should not contain parts indicating commercial use

