

# **STRUCTURE AND ENVIRONMENT**

**ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND ENERGY**

No. 3/2013 vol. 5 PL ISSN 2081-1500 [www.sae.tu.kielce.pl](http://www.sae.tu.kielce.pl) KIELCE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



# Contents

## structure

---

WOJCIECH PIASTA, MONIKA JAWORSKA, AGNIESZKA BUCIK

- INFLUENCE OF HIGH CALCIUM AND LOW CALCIUM FLY ASHES ON STRENGTH AND WATER ABSORPTION OF MORTARS .....** 5

IGA JASIŃSKA

- THE PROPERTIES OF SILICATE PRODUCTS MODIFIED BY LDPE GRANULES .....** 11

KRZYSZTOF MACIEJEWSKI, PIOTR RAMIĄCZEK, ANNA CHOMICZ-KOWALSKA

- THE IMPACT OF EBA AND ECB POLYMER MODIFICATION OF 50/70 BITUMEN .....** 15

MATEUSZ M. IWAŃSKI, ANNA CHOMICZ-KOWALSKA

- INFLUENCE OF SYNTHETIC FIBRES ON THE PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE PRODUCED AT REDUCED TEMPERATURE .....** 21

## environment

---

MARTIN PEŠEK

- THE INFRARED MEASUREMENT METHOD IN THE AIR IN SMALL CLOSED AREAS .....** 33

EWA ZENDER-ŚWIERCZ, JERZY Z. PIOTROWSKI

- THERMOMODERNIZATION A BUILDING AND ITS IMPACT ON THE INDOOR MICROCLIMATE .....** 37

PAWEŁ STAWCZYK

- THE INFLUENCE OF THE INTERPHASE REACTOR ON THE OPERATION OF 12-PULSE AC/DC THYRISTOR RECTIFIER .....** 41

- HOW TO PREPARE THE MANUSCRIPT .....** 49

- THE REVIEW PROCESS .....** 50

## **EDITORIAL BOARD**

Main Editor Jerzy Z. Piotrowski

Editor Radosław Zaborek

Secretary of the Editorial Board Łukasz Orman

Sectional Editor STRUCTURE Marek Iwański

Sectional Editor ENVIRONMENT Lidia Dąbek

## **SCIENTIFIC BOARD**

### **STRUCTURE**

Chairmanship Jerzy Wawrzeńczyk

Tomasz Arciszewski (USA), Lesław Brunarski, Go Iwahana (Japan), Zbigniew Kowal, Jozef Melcer (Slovakia),

Michaił V. Nemchinov (Russia), Victor Proskuriakow, Zbigniew Rusin, Bohdan Rymaszewski, Wacław Seruga,

Małgorzata Wilczkiewicz (USA)

### **ENVIRONMENT**

Chairmanship Tomasz Kozłowski

Satoshi Akagawa (Japan), Elżbieta Bezak-Mazur, Dorota Chwieduk, Graham Herbertson (Scotland), Andrzej Kapłon, Andrzej Kuliczkowski, Janusz Łomotowski, Paweł Purgał, Leszek Radziszewski, Anatol Stroy (Ukraine), Maria Żygadło

[www.sae.tu.kielce.pl](http://www.sae.tu.kielce.pl)

[sae@tu.kielce.pl](mailto: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 2081-1500

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2013

25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7

tel. 41 34 24 581

[www.tu.kielce.pl/organizacja/wydawnictwo](http://www.tu.kielce.pl/organizacja/wydawnictwo)



**Kielce University of Technology**  
**2013**



**structure**  
**structure**



WOJCIECH PIASTA<sup>1</sup>

MONIKA JAWORSKA<sup>2</sup>

AGNIESZKA BUCIK<sup>3</sup>

Kielce University of Technology

<sup>1</sup>e-mail: wpiasta@tu.kielce.pl

<sup>2</sup>e-mail: monikajaworska@o2.pl

<sup>3</sup>e-mail: bucikagnieszka@gmail.pl

# INFLUENCE OF HIGH CALCIUM AND LOW CALCIUM FLY ASHES ON STRENGTH AND WATER ABSORPTION OF MORTARS

## Abstract

The research was carried out to evaluate water absorption and strength of cement mortars with admixture of fly ashes. There have been presented experimental results of high and low calcium fly ashes content and their combination on the physical properties of cement mortars. The tests were carried out using samples 4 x 4 x 16 cm in accordance to standard procedures.

**Keywords:** fly ash, mortars, water absorption

## 1. Introduction

Fly ashes play significant role in contemporary concrete technology, and their application allows obtaining economical and ecological benefits. High calcium and low calcium fly ashes, as components of concrete modify the properties of both concrete mixture, as well as concrete [1]. Physical properties of cement composites, such as water absorption and strength above all depend on microstructure of cement mortar, and further, on capillary porosity, distribution of pores sizes and phase composition of mortar. These properties are in turn tightly connected with w/c ratio and the degree of cement hydration, which is considerably influenced by content and type of mineral admixture in cement mortar. To a considerable degree, high calcium and low calcium fly ashes delay hydration of a binder, influencing the strength and other physical properties of composites [3, 4]. Giergiczny [5] points to positive influence of high calcium ash on 28-day strength of concretes. On the other hand, replacement of part of cement volume with low calcium fly ash causes reduction in strength in tender age of cement mortar [6].

Water absorption may be described as the ability to "suck up" water through capillaries [8]. With a constant w/cm ratio, water absorption increases,

approximately, linearly with content of cement mortar [9]. It has to be specifically taken into account with composites with large amount of binder. Water absorption may also be influenced by the application of mineral additive that replaces part of Portland cement volume (similarly, like the change in cement type). In connection with slower hydration and due to longer pozzolanic reaction, concrete's water absorption may be increased when binder contains fly ashes. According to Rusin [10], replacement of part of cement volume with low calcium fly ash boosts up water absorption of mortars. The influence of high calcium fly ashes and their amounts on water absorption is not fully explained.

## 2. Own surveys

Conducted surveys aimed at determining influence of two fly ashes on strength and water absorption of mortars. Survey agenda assumed determination of relationship between strength and water absorption and the type and amount of used fly ash. Low calcium and high calcium fly ashes were considered.

### 2.1. Characteristics of surveyed mortars

Portland cement CEM I 42,5 R, silica(V) and high calcium(PW) fly ashes were used. Experiment covered 7 types of mortars made of cement or cement

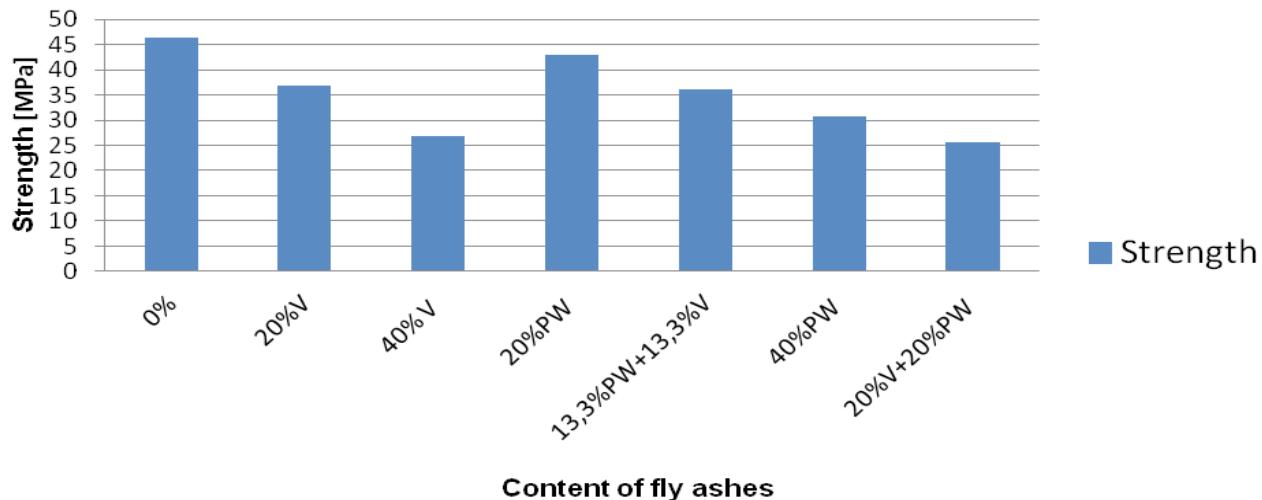


Fig. 1. Influence of fly ash content on strength of cement mortars

and fly ashes or their mixture. Table 1 lists the content of ashes in binder and mortars' compositions. W/s ratio was constant and amounted to: 0.6. Weight ratio of components, cement : sand : water was 1 : 3 : 0.6. Mortars were prepared according to unified procedure in terms of dosage, mixing and samples' forming.

**Table 1.** Gravimetric composition of surveyed mortars

Content [%]	Cement content [g]	Content V [g]	Content PW [g]
CEM I 100%	1000	0	0
CEM I 80% + V20%	400	100	0
CEM I 60% + V40%	300	200	0
CEM I 80% + PW20%	400	0	100
CEM I 60% + PW40%	300	0	200
CEM I 60% + V20% + PW20%	300	100	100
CEM I 73.3% + 13.3%V + 13.3%PW	370	65	65

## 2.2. Survey methodology

Compressive strength test was conducted according to PN-EN 196-1:2005. Every compressive strength test was conducted for six 40 x 40 x 160 mm mortar samples, after 28 days of curing in water. Water absorption of every mortar was determined with the use of three standardized samples, which after 28 days of curing in water were dried for 48 h in temperature of 105°C.

## 3. Analysis of test results

Table 2 contains results of compressive strength test. The influence of fly ash admixtures on strength of cement composites was shown in Figure 1.

**Table 2.** Results of mortars' strength tests,  $f_{c28}$

Mortar – ash content	Average strength [MPa]
0%	46.27
20%V	36.95
40%V	26.87
20%PW	42.88
40%PW	30.84
20%V + 20%PW	25.61
13.3%PW+13.3%V	36.12

Relationships illustrated in Figures 1 and 3 prove that fly ash admixture considerably affects strength of cement composites. Mortar strength lowers together with the increase of fly ash amount in binder. Mortars containing high calcium ash showed much higher compressive strength than mortars with low calcium ash. Samples containing 20% of high calcium ash reached almost the same strength, as mortars prepared with CEM I. Strength of mortars containing low calcium ash decreases proportionally to its content and is lower than the strength of mortars with high calcium ash. Figure 3 shows that strength clearly tends to decline with the rise in fly ash contents. Beyond of strength diminishing together with rising content of each of the ashes or their mixture qualitative effect which is connected with type of fly ash. This effect was marked in Figure 3 with two straight lines (marked blue and red), which clearly show that strength of mortars with an addition of high calcium ash is higher than low calcium ash.

Results of water absorption test were presented in Table 3 and Figure 2.

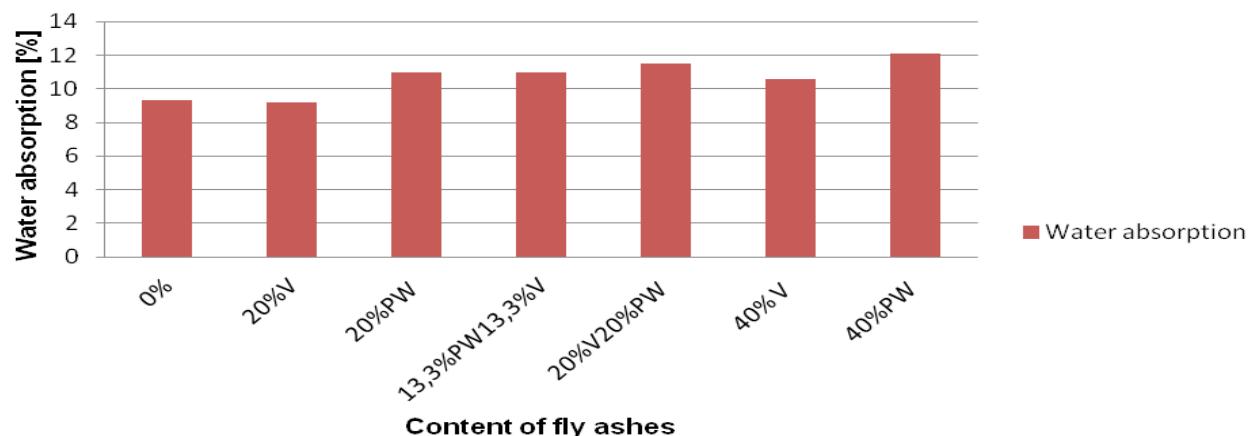


Fig. 2. Influence of fly ashes on water absorption of cement mortars

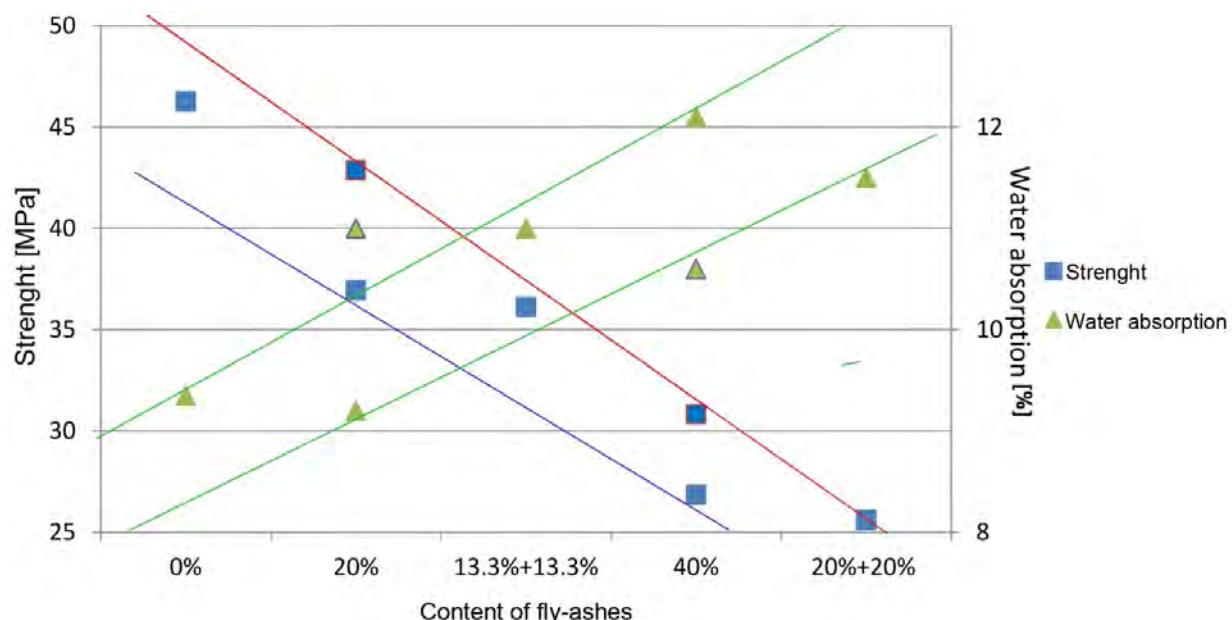


Fig. 3. Relationship between strength and water absorption of cement mortars and amount of fly ashes in binder

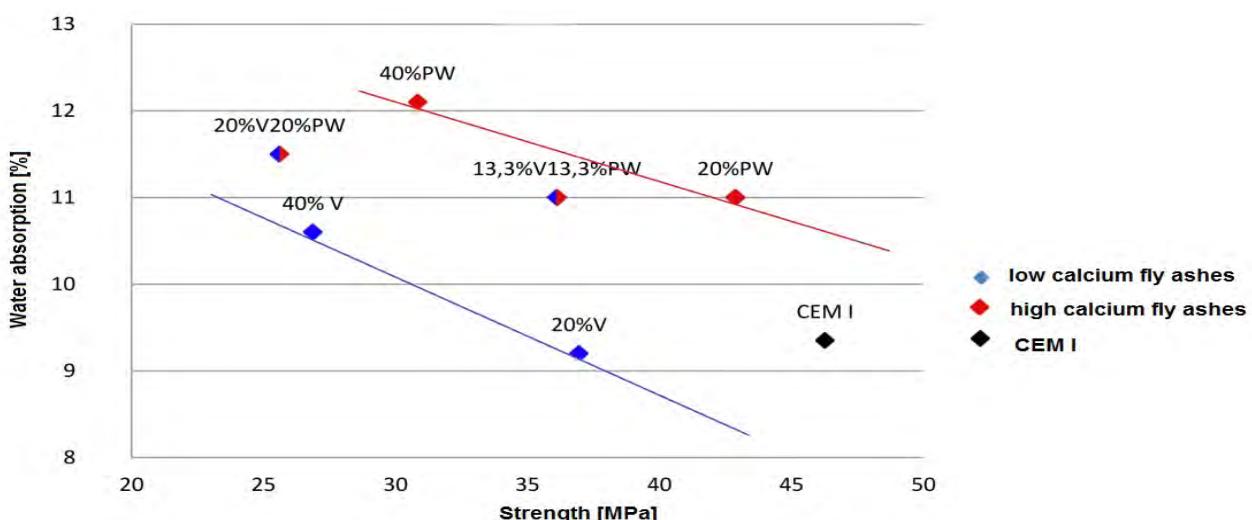


Fig. 4. Relationship between strength and water absorption of cement mortars

**Table 3.** Results of mortars' gravimetric water absorption,  $n_w$ 

Mortar – ash content	Average water absorption [%]
0%	9.35
20%V	9.20
40%V	10.6
20%PW	11.0
40%PW	12.1
20%V20%PW	11.5
13.3%PW13.3%V	11.0

Results of gravimetric water absorption are in the range from 9.20% for mortars with 20% of low calcium ash addition to 12.1% for mortars in which 40% of Portland cement was replaced with high calcium ash. The mortars containing low calcium ash in the amount of 20% have almost the same water absorption, as mortars of plain Portland cement. In the case of mortars with 20% addition of high calcium ash, as well as mortars, in which the amount of ashes reached 26.6%, water absorption was the same, equalling to 11%, that is much less than that of mortars with Portland cement and mortars with binder containing low calcium ash alone. Cement composites in binder of which 40% Portland cement was replaced with fly ashes showed among surveyed samples the highest ability to absorb water. Aside quantitative effect, connected with replacing cement with fly ashes, very clear qualitative influence was identified. It means that the rise in water absorption of mortars with high calcium ash added is much higher than that in the case of mortars with low calcium ash added, which was illustrated with straight (green) lines in Figure 3.

Figure 4 illustrates relationship between strength and water absorption of hardened mortars. The increase in strength is accompanied by the fall of water absorption of cement composites. It was noted that despite higher strengths of mortars containing high calcium ash, water absorption is significantly higher than in the case of mortars containing low calcium ash or mixture of both ashes.

## 4. Conclusions

On the basis of test results following conclusions have been drawn:

- Fly ashes exercise significant impact on physical properties of cement mortars. Clear quantitative, as well as qualitative influence of applied fly ashes and their mixtures was found.
- Strength of mortar containing high calcium ash added is higher than the strength in the case of low calcium ash mortar.

- Despite higher strengths of mortars containing high calcium ash, water absorption is distinctly higher than that of mortars containing low calcium ash and mixture of both ashes.
- If more than 20% of cement is replaced with low calcium or high calcium ash or their mixtures, physical properties of cement composites are substantially influenced.

## References

- [1] Gołaszewski J., Kostrzanowska A., Ponikiewski T., Antonowicz G., *Influence of high calcium fly ash on rheological properties of cement pastes and mortar*. Roads and Bridges, Warszawa, 2013, pp. 99–112.
- [2] Gołaszewski J., Drewniok M., *Wpływ popiołu wapiennego na efekt działania domieszek napowietrzających* [Influence of high calcium ash on the effect of aeration admixture performance]. Civil and Environmental Engineering, 2011, pp. 267–274.
- [3] Thomans M.D.A., Shehata M.H., Shashiprakash S.G., Hopkins D.S., Cail K., *Use of ternary cementitious systems containing low calcium fume and fly ash in concrete*. Cement and Concrete Research 1999, Vol. 29, pp. 1270–1214.
- [4] Giergiczny Z., *Rola popiołów lotnych wapiennych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości spojów budowlanych i tworzyw cementowych* [Role of high calcium and low calcium fly ashes in shaping properties of construction binders and cement materials], Politechnika Krakowska, Kraków, 2006.
- [5] Giergiczny Z., *Właściwości popiołu lotnego a trwałość betonu* [Fly ash properties and concrete's durability]. Polski Cement, 2007.
- [6] Nowak-Michta A., *Compressive strength of low calcium fly ash concretes*. Technical Transactions, Kraków, 2012.
- [7] Burden D., *The Durability of Concrete Containing High Levels of Fly Ash Research and development Information*. Masters of Science in Engineering, New Brunswick 2006.
- [8] Castro J., Bentz D., Weiss J., *Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete*. Cement & Concrete Composites, USA, 2011.
- [9] Koliás S., Georgiou C., *The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete*. Cement & Concrete Composites, Greece 2005.
- [10] Rusin Z., Stelmaszczyk G., Świercz P., Nowak Ł., *Porosity and water absorption of mortars with CEM I, CEM II/B-V and CEM III/A in context of frost resistance*.
- [11] Wawrzefczyk J., Molendowska A., Kłak A., *Wpływ wybranych czynników na wyniki badania nasiąkliwości betonu* [Influence of selected factors to concrete's water absorption test results]. „Budownictwo i Architektura” 2013, 12(3), s. 239–246.

Wojciech Piasta  
Monika Jaworska  
Agnieszka Bucik

# Wpływ wapiennego i krzemionkowego popiołu lotnego na wytrzymałość i nasiąkliwość zapraw

## 1. Wprowadzenie

Popioły lotne odgrywają bardzo ważną rolę we współczesnej technologii betonu, a ich stosowanie pozwala na uzyskanie korzyści ekonomicznych i ekologicznych. Popioły lotne wapienne i krzemionkowe jako składnik betonu modyfikują zarówno właściwości mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu [1]. Właściwości fizyczne kompozytów cementowych, takie jak nasiąkliwość i wytrzymałość są przede wszystkim zależne od mikrostruktury zaczynu cementowego, a w tym od porowatości kapilarnej, rozkładu wielkości porów oraz składu fazowego zaczynu. Cechy te z kolei są mocno związane ze stosunkiem w/c oraz stopniem hydratacji cementu, na który w sposób bardzo istotny wpływa zawartość i rodzaj dodatków mineralnych w zaczynie cementowym. Popioły lotne: krzemionkowy i wapienny, w znacznym stopniu opóźniają hydratację spoiwa wpływając na wytrzymałość i inne właściwości fizyczne kompozytów [3, 4]. Giergiczny [5] wskazuje na korzystny wpływ popiołu wapiennego na wytrzymałość 28-dniową betonów. Natomiast zastąpienie części cementu popiołem lotnym krzemionkowym powoduje redukcję wytrzymałości w młodym wieku zaczynu cementowego [6].

Nasiąkliwość można opisać jako zdolność do podciągania wody przez kapilary [8]. Przy stałym stosunku w/c absorpcja wody zwiększa się w przybliżeniu liniowo wraz z zawartością zaczynu cementowego [9]. Należy zwrócić szczególną uwagę przy kompozytach zawierających dużą ilość spoiwa. Wpływ na nasiąkliwość może mieć także wprowadzany rodzaj dodatku mineralnego zastępującego część cementu portlandzkiego (podobnie jak zmiana rodzaju cementu). W związku z wolniejszą hydratacją z powodu wydłużonej w czasie reakcji pucolanowej, nasiąkliwość betonu może być zwiększena w przypadku gdy spoiwo zawiera popioły lotne. Według Rusina [10] zastąpienie części cementu popiołem krzemionkowym

zwiększa nasiąkliwość zapraw. Nie do końca jest wyjaśniony wpływ popiołów wapiennych oraz ich ilości zastępujących części cementu na nasiąkliwość.

## 2. Badania własne

Zrealizowane badania miały na celu określenie wpływu dwóch popiołów lotnych na wytrzymałość i nasiąkliwość zapraw. Plan badań zakładał określenie zależności wytrzymałości i nasiąkliwości od rodzaju i ilości stosowanego popiołu lotnego. Stosowane popioły lotne to popiół krzemionkowy i wapienny.

### 2.1. Charakterystyka badanych zapraw

Do badań zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R, popioły: krzemionkowy(V) i wapienny(PW). Doświadczenie objęło 7 rodzajów zapraw wykonywanych z cementu lub cementu i popiołu lotnego lub ich mieszanki. W tabeli 1 została podana zawartość popiołów w spoiwie oraz skład zapraw. Współczynnik w/s był stały i wynosił 0,6. Stosunek wagowy składników, cement : piasek : woda wynosił 1 : 3 : 0,6. Zaprawy zostały przygotowane według ujednoliconej procedury dotyczącej dozowania, mieszania i formowania próbek.

### 2.2. Metody badań

Próbę wytrzymałości na ściskanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 196-1:2005. Każdemu badaniu wytrzymałości na ściskanie poddano sześć próbek zapraw 40 x 40 x 160 mm po 28 dniach dojrzewania w wodzie. Nasiąkliwość każdej zaprawy określono na trzech próbkach normowych, które po 28 dniach dojrzewania w wodzie wysuszono w temperaturze 105°C, przez 48 h.

### 3. Analiza wyników badań

Z przedstawionych zależności na rysunku 1 i 3 wynika, że dodatek popiołów lotnych w znaczący sposób wpływa na wytrzymałość kompozytów cementowych. Wraz ze wzrostem ilości popiołu lotnego w spoiwie wytrzymałość zaprawy maleje. Zaprawy

zawierające popiół wapienny wykazały znacznie większą wytrzymałość na ściskanie niż zaprawy z popiołem krzemionkowym. Próbki, w których użyto 20% popiołu wapiennego, uzyskały prawie taką samą wytrzymałość po 28 dniach jak zaprawy wykonane z CEM I. Wytrzymałość zapraw z cementu zawierającego popiół krzemionkowy maleje proporcjonalnie do jego zawartości i jest mniejsza niż wytrzymałość zapraw z popiołem wapiennym. Rysunek 3 pokazuje, że wytrzymałość ma wyraźną tendencję malejącą wraz ze wzrostem zawartości popiołów lotnych. Jednak oprócz zmniejszania się wytrzymałości wraz z coraz większą ilością każdego z popiołów lub ich mieszaniny zaznacza się wyraźnie wpływ jakościowy związany z rodzajem popiołu lotnego. Wpływ ten na rysunku 3 zasygnalizowano dwiema prostymi (oznaczone kolorem niebieskim i czerwonym), które wyraźnie pokazują, że wytrzymałość zaprawy z dodatkiem popiołu wapiennego jest wyższa, niż z dodatkiem popiołu krzemionkowego.

Wyniki nasiąkliwości wagowej mieścią się w zakresie od 9,20% dla zapraw z 20% dodatkiem popiołu krzemionkowego do 12,1% dla zapraw, w których zastąpiono 40% cementu portlandzkiego popiołem wapiennym. Zaprawy zawierające popiół krzemionkowy w ilości do 20% mają prawie taką samą nasiąkliwość jak zaprawy wykonane z czystego cementu portlandzkiego. W przypadku zapraw z 20% dodatkiem popiołu wapiennego jak i zaprawy, w których ilość popiołów lotnych wynosiła 26,6% nasiąkliwość była taka sama i wynosiła 11%, a więc była dużo niższa niż zapraw z cementem portlandzkim i zaprawy z spoiwem zawierającym sam popiół krzemionkowy. Kompozyty cementowe, w których spoiwie zastąpiono 40% cementu portlandzkiego popiołami lotnymi wykazały największą zdolność do wchłaniania wody spośród badanych próbek. Oprócz wpływu ilościowego związanego z zastąpieniem cementu przez popioły lotne, stwierdzono bardzo wyraźny wpływ jakościowy. Polega on na tym, że wzrost nasiąkliwości zapraw z dodatkiem popiołu wapiennego jest znacznie większy niż zapraw z dodatkiem popiołu krzemionkowego, co oznaczono prostymi (koloru zielonego) na rysunku 3.

Rysunek 4 przedstawia relację między wytrzymałością i nasiąkliwością stwardniających zapraw. Wzrostowi wytrzymałości towarzyszy spadek nasiąkliwości kompozytów cementowych. Zaobserwowano, że mimo wyższych wytrzymałości zapraw z popiołem wapiennym nasiąkliwość jest wyraźnie większa niż zapraw z popiołem krzemionkowym i mieszaniną obydwóch popiołów.

## 4. Wnioski

Na podstawie wyników badań stwierdzono następujące wnioski:

- Popioły lotne mają znaczący wpływ na właściwości fizyczne zapraw cementowych. Stwierdzono wyraźny wpływ ilościowy i jakościowy stosownych popiołów lotnych i ich mieszanin.
- Wytrzymałość zaprawy z dodatkiem popiołu wapiennego jest wyższa niż z dodatkiem popiołu krzemionkowego.
- Mimo wyższych wytrzymałości zapraw z popiołem wapiennym, nasiąkliwość jest wyraźnie większa niż zapraw z popiołem krzemionkowym i mieszaniną obydwóch popiołów.
- Zastąpienie o więcej niż 20% cementu przez popioły: krzemionkowy i wapienny lub ich mieszanki ma istotny wpływ na właściwości fizyczne kompozytów cementowych.

IGA JASIŃSKA

Kielce University of Technology

e-mail: igajas@tu.kielce.pl

# THE PROPERTIES OF SILICATE PRODUCTS MODIFIED BY LDPE GRANULES

## Abstract

The following article presents the results obtained through the modification of sand-lime matter. The modifying filler is a low-density polyethylene granules (hereinafter referred to as LDPE), formed as a result of the recycling process. The main purpose of the research was to receive a lightweight, recyclable product with physical and mechanical properties similar to abovementioned traditional sand-lime products. The filler has given the desired effect, however the compressive strength of newly created elements has significantly decreased. It is therefore concluded that from the building operation point of view, modified products that contain less than 9% of LDPE filler are relevant. The paper describes the examination methodology and the results in the form of tables and graphs.

**Keywords:** sand-lime products, silicates, masonry elements, polyethylene LDPE, recycling, compressive strength, density, absorption, modification, experiments, lightweight fillers

## 1. Introduction

Silicate products are construction materials, in which the basic ingredient is a sand-lime matter. These products are primarily characterized by high compressive strength (to about 20 MPa). Furthermore, silicates are commonly considered to be environment-friendly, because unlike cellular concrete, do not contain cement, characterized by high content of radioactive isotopes, such as radium, potassium and thorium. Nevertheless, high bulk density tends to seek production methods and recipes of lighter blocks with properties similar to traditional products.

Methods of modification of these products are not widely known in the literature. More tests are subjected to cement and silica cement products.

The first known in the literature attempts to modify mentioned above construction products took place at the turn of the 19 and 20<sup>th</sup> century. A cement-gypsum mortar was modified. Then, a few years later, as a result of combination of curing and air bubbles formation process was obtained the first modern lightweight concrete, called then a cellular concrete [1]. In the following years, to the cement-silica matter many other additives were introduced, such as polystyrene granules [2], polystyrene foam [3], comminuted glass foam comes from glass cullet or blast furnace slag [4], the resin foam particles with foaming agent [5], or glass foam aggregate reinforced

i.a. by glass, steel, titanium or carbon fibers and with addition of fly ash [6].

From a practical point of view, in building operating those silicate products are relevant whose compressive strength is higher than 10 MPa [7]. Having regard to environmentally sustainable development and the progress in science in the field of masonry units modification, the main purpose of research was obtaining a light product, which can be recycled and has a physical and mechanical properties similar to a.n. traditional sand-lime products.

Among the many products available on the market that might be helpful in reducing bulk density of sand-lime elements, special attention is paid to the low-density polyethylene (LDPE) in granulate form, which is a result of recycling process. So far this material has found application mainly in the electronic, electrical and food industry, household appliances as well as in civil engineering (in the manufacture of foam insulations, gas, central heating and air conditioning pipes, etc.)

Polyethylene referred to in the paper is characterized by low bulk density (up to 0.91 g/cm<sup>3</sup>) and water absorption after 24 hours lower than 0.03%. These properties have prompted to use this product as a filler in the silicate matter in order to reduce the density of the obtained products.

## 2. Examination methodology

The starting material to conduct the preliminary tests was a sand-lime mixture, which consisted of quartz sand (approx. 90–92% by weight), calcined lime (about 5–8% by weight) and water. In the following steps formed by recycling LDPE granules, in order 3, 6, 9, 12 and 15% of the weight were used as a filler. The resulting matter was formed in a rectangular blocks with dimensions of  $4 \times 4 \times 16$  cm, compacted and then autoclaved for 8 hours at 203°C. The product prepared in this way was weighted and then subjected to a compressive strength test.

Each of made elements was desiccated in a dryer with air circulation in order to achieve dry matter in accordance with the guidelines of the norm EN 772-13/2001 [8]. In the next stage the samples were weighted and then immersed in water to determine water absorption (according to EN 771-2:2003+A1:2005, [9]).

## 3. Results of research

Tests and calculations of selected physical parameters were performed on each of the six samples with identical composition. Further studies were carried out on separate samples of silicates. The results obtained were averaged and shown in Table 1.

**Table 1.** The average physical properties of modified silicate products

Granules mass percentage in sample [%]	Gross density [g/cm <sup>3</sup> ]	Water absorption [%]	Compressive strength [MPa]
0	1.72	15.90	20.51
3	1.68	15.10	18.4
6	1.58	14.49	16.3
9	1.5	13.04	10.23
12	1.27	12.07	9.35
15	1.08	11.40	8.51

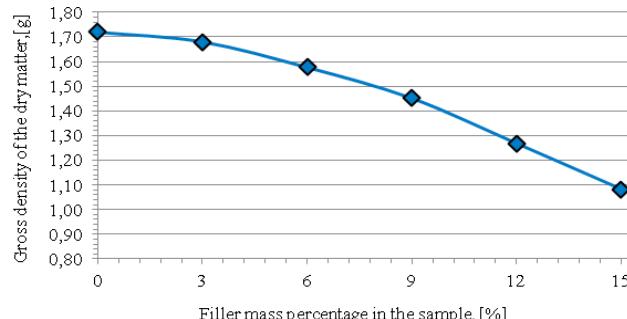


Fig. 1. Impact of LDPE granules on gross density of received sand-lime product

The obtained values of gross density confirm the assumption that the partial modification of lime-

cement mixture by the used filler affects (reduces) the mass of the product, which clearly presents Figure 1.

Interference in the composition of the mixture has not shown the expected results, because together with the decrease in density decreases the compressive strength of tested silicate product (Fig. 2).

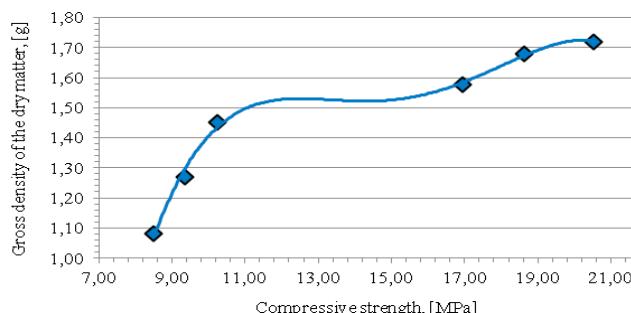


Fig. 2. Impact of LDPE granules on gross density of received sand-lime product

The absorption of the silicate material was calculated according to the procedure laid in the norm PN-EN 771-2:2003+A1:2005 [10] and presented in Table 1.

From the obtained results a growing trend in water absorption of the received product with decreasing compressive strength was noticed (Fig. 3).

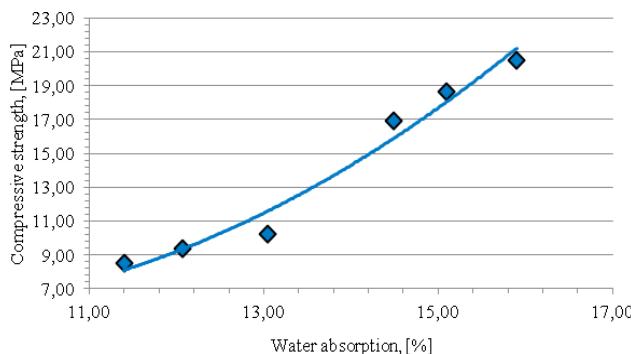


Fig. 3. The relationship between water absorption and compressive strength of the modified silicate material

## 4. Conclusions

The additive in form of low-density polyethylene granules (LDPE) to the silicate matter, applied in the study, is a recycling product. The partial, increasing share of the filler in sand-lime mixture has contributed to achieving the desired reduction in gross density. Unfortunately, despite the high compressive strength of LDPE, with increasing content of granules, there is a decrease in compressive strength in relation to the standard samples. In building operating only these modified products may be applied which contain no more than 9% by weight of LDPE.

Furthermore, it is noted that the series of obtained products is characterized by a significantly lower than

traditional products water absorption, which means a smaller amount of absorbed water in the examined materials.

To summarize the above observation, there is an implication that further research in order to achieve the highest possible strength with the lowest bulk density, should be carried out with other fillers, which improve the compressive strength of the newly manufactured products.

## References

- [1] Materiały informacyjne firmy Solbet (<http://www.solbet.pl/>).
- [2] Patent DE 4118027 (A1), 1992.
- [3] Patent DE 1157978 (A1), 2001.
- [4] Patent US 6616725 (B1), 2003.
- [5] Patent EP 1375455 (A1), 2004.
- [6] Patent US 7695560 (B1), 2010.
- [7] Linczowski Cz., Dachowski R.: *Porównanie najpopularniejszych ściekowych materiałów budowlanych stosowanych w budownictwie jednorodzinnym*. Wyd. Przemiana, Kielce 1998.
- [8] PN-EN772-13/2001 Metody badań elementów murowych. Część 13.
- [9] PN-EN771-2:2006+A:2005: Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 2: Elementy murowe silikatowe.

Iga Jasińska

# Właściwości użytkowe wyrobów silikatowych modyfikowanych granulatem LDPE

## 1. Wprowadzenie

Elementy silikatowe to materiały budowlane, których podstawowy składnik stanowi masa wapienno-piaskowa. Wyroby te charakteryzuje wysoka wytrzymałość na ściskanie, osiągającą nawet 35 MPa. Niemniej duża masa objętościowa skłania do poszukiwania metod i receptury wytwarzania lżejszych bloczków o właściwościach podobnych do wyrobów tradycyjnych.

W literaturze nie są powszechnie znane metody modyfikacji tych wyrobów. Częściej badaniom poddawane są wyroby cementowe i cementowo-silikatowe. Pierwsze znane w literaturze próby modyfikacji tych wyrobów miały miejsce na przełomie XIX i XX w., kiedy to modyfikacji poddano zaprawę cementowo-gipsową. Następnie kilkanaście lat później w wyniku połączenia procesów utwardzania z procesami powstawania pęcherzyków powietrza po raz pierwszy uzyskano nowoczesny lekki beton, zwany ówcześnie betonem komórkowym [1]. W latach kolejnych do masy cementowo-silikatowej wprowadzano wiele innych dodatków, np.: granulki styropianowe [2], pianki polistirenowe [3], rozdrobnioną piankę szklaną pochodząą ze stłuczków szkła lub żużla wielkopiecowego [4].

Z praktycznego punktu widzenia w eksploatacji budowli właściwymi wyrobami są te elementy silikato-

we, których wytrzymałość na ściskanie jest większa niż 10 MPa. Celem wykonanych doświadczeń było uzyskanie lekkiego bloczku o właściwościach fizyko-mechanicznych podobnych do właściwych wyrobów wapienno-piaskowych.

Wśród wielu produktów oferowanych na rynku mogących służyć obniżeniu gęstości objętościowej wyrobów wapienno-piaskowych szczególną uwagę zwraca się na polietylen o małej gęstości (LDPE) w postaci granulatu, powstały w wyniku recyklingu.

Polietylen, o którym mowa w niniejszym artykule, charakteryzuje mała gęstość objętościowa oraz niska chłonność wody. Właściwości te zadecydowały o wykorzystaniu tego produktu jako wypełniacza w masie silikatowej w celu zmniejszenia gęstości otrzymanywanych produktów.

## 2. Metodyka badań eksperymentalnych

Materiałem wyjściowym do wykonania badań wstępnych była mieszanka wapienno-piaskowa, w której skład wchodzi piasek kwarcowy (ok. 90–92% masy), wapno kalcynowane (ok. 5–8% masy) oraz woda. W kolejnych krokach jako wypełniacz wprowadzono granulat LDPE powstały w wyniku recyklingu, stanowiący kolejno 3, 6, 9, 12 i 15% udziału masy.

Zarówno dla tradycyjnych, jak i modyfikowanych wyrobów wapienno-piaskowych określono następujące właściwości użytkowe zgodnie z polskimi normami [8, 9]:

- gęstość brutto,
- absorpcja wody,
- wytrzymałość na ściskanie.

### 3. Wyniki badań

Badania i obliczenia wybranych parametrów fizycznych wykonano na każdej z sześciu próbek o identycznym składzie jakościowym. Kolejne badania wykonywane były na odrębnych próbkach silikatowych. Otrzymane wyniki uśredniono i przedstawiono w tabeli 1.

Otrzymane wartości gęstości brutto potwierdzają założenie, że częściowa modyfikacja mieszanki wapienno-cementowej stosowanym wypełniaczem wpływa redukcyjnie na masę wytworzonego elementu, co wyraźnie przedstawiono na rysunku 1.

Ingerencja w skład mieszanki nie wykazała zakładanych rezultatów, ponieważ wraz ze spadkiem gęstości maleje wytrzymałość na ściskanie badanych elementów silikatowych (rys. 2).

Absorpcaja elementu silikatowego została obliczona zgodnie z procedurą zawartą w normie PN-EN 771-2:2003+A1:2005 [9]. Na podstawie otrzymanych wyników zauważono rosnący trend absorpcji wody przez otrzymany wyrób silikatowy wraz z malejącą wytrzymałością na ściskanie (rys. 3).

### 4. Wnioski

Częściowy, wzrastający udział wypełniacza (granulatu LDPE) w mieszance wapienno-piaskowej przyczynił się do zamierzonego zmniejszenia gęstości brutto. Niestety, pomimo wysokiej wytrzymałości na ściskanie LDPE, wraz ze wzrostem zawartości granulatu zauważa się spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbek wyjściowych. W eksploatacji budowli zastosowanie mogą mieć jedynie te wyroby modyfikowane, które zawierają nie więcej niż 9% udziału w masie.

Ponadto zauważa się, że seria uzyskanych wyrobów charakteryzuje się wyraźnie mniejszą absorpcją wody niż tradycyjne wyroby, co oznacza mniejszą ilość pochłanianej wody w badanych wyrobach.

Reasumując powyższe spostrzeżenia nasuwa się stwierdzenie, że dalsze badania, w celu osiągnięcia możliwie wysokiej wytrzymałości przy możliwie najniższej gęstości objętościowej, należy prowadzić z udziałem innych wypełniaczy, wpływających na poprawę wytrzymałości na ściskanie nowo wytworzonych elementów.

KRZYSZTOF MACIEJEWSKI<sup>1</sup>

PIOTR RAMIĄCZEK<sup>2</sup>

ANNA CHOMICZ-KOWALSKA<sup>3</sup>

Kielce University of Technology

<sup>1</sup>e-mail: kmaciejewski@tu.kielce.pl

<sup>2</sup>e-mail: piotrr@tu.kielce.pl

<sup>3</sup>e-mail: akowalska@tu.kielce.pl

# THE IMPACT OF EBA AND ECB POLYMER MODIFICATION OF 50/70 BITUMEN

## Abstract

This paper presents the results of research concerning the EBA (ethylene-butyl acrylate copolymer) and the ECB (ethylene copolymer bitumen) modifications on 50/70 bitumen in contents of 2%, 4% and 6%. The research area included the tests for determination of penetration at 25°C, softening temperature (according to the "Ring and Ball" method) and Fraass breaking point. The research has shown visible impact of both modifiers on the properties of the base 50/70 bitumen significantly reducing the penetration, reducing ductility and increasing softening point. It was also found that the modification slightly increased the breaking point temperature. Analysis of penetration index PI and the temperature range of plasticity (TZP) have shown that the ECB modification has a more positive effect on properties of the bitumen.

**Keywords:** modification, polymer, plastomer, ECB, EBA, 50/70 bitumen

## 1. Introduction

The rapid increase in traffic together with simultaneous increase in axle loads demands the designed pavements to be more resistant to the damaging effects caused by the moving vehicles. The improvement of the road surface quality is achieved by the use of new technologies, new materials and modifications of existing technologies and materials.

Many years of research have shown that the quality of the binder has a large impact on the durability and quality of the whole pavement. The requirements for asphalt have been increasing regularly along with the increase in road requirements. Currently, the asphalt modifications are used to fulfill stringent requirements for asphalt mixes in a wide range of temperatures [2, 6]. The first attempts to use polymers as asphalt modification agents were held in the fifties of the 20<sup>th</sup> century [1]. The purpose of this modification is to extend the lifespan and improve the performance of asphalt mixes. This requires an increase in resistance of asphalt mixtures to permanent deformation, fracture, fatigue, aging and the influence of external factors [2].

Asphalt modification can be performed by the use of different agents, for example: elastomers, plastomers, synthetic resins, rubber granules from waste tires or

natural asphalt [5]. One of the most popular modifiers are plastomers, which are characterized by a higher proportion of the permanent deformations compared to elastomers and increased stiffness at high temperatures, compared to base asphalt. Plastomers do not improve the low temperature properties of the binder [2].

The research concerned the modification of the 50/70 binder using two plastomers: low crystallinity ethylene copolymer with acrylate butyl (EBA) and ethylene copolymer with a special type of bitumen (ECB).

The low crystallinity ethylene copolymer with acrylate butyl (EBA) is usually used for production of construction and horticultural films, hotmelt adhesives and coloring agents for plastics. Thanks to its properties related with the low glass transition temperature and good properties at low temperatures it is also used in the modification of plastics and binders. Ethylene copolymer with a special type of bitumen (ECB) is usually used in production of modified bitumen membranes, waterproof membranes and in the production of roofing. Due to the use of the special bitumen type reaching up to 50% it is easily mixed with the asphalt.

This paper presents the results of asphalt modification using ECB and EBA polymers an the

assessment of the asphalt quality in terms of its basic parameters.

## 2. Protocol and methodology

The base material for this research was the 50/70 bitumen. To investigate the influence of the ECB and EBA modifiers on the bitumen they were added in amounts of 2%, 4% and 6%. This gave six types of specimens:

- base asphalt 50/70, marked “A”
- modified asphalt 50/70 + 2% EBA, marked “B”
- modified asphalt 50/70 + 4% EBA, marked “C”
- modified asphalt 50/70 + 6% EBA, marked “D”
- modified asphalt 50/70 + 2% ECB, marked “E”
- modified asphalt 50/70 + 4% ECB, marked “F”
- modified asphalt 50/70 + 6% ECB, marked “G”.

The polymers were added to the base asphalt in order to achieve the expected content through mixing at the temperature of 170°C and stirring speed 400 rpm, for the time of 15 min.

To determine how the modification affected the bitumen properties the following tests were performed:

- Penetration at 25°C, in accordance with PN-EN 1426.
- Ductility at 25°C, in accordance with PN-85/C-04132.
- Softening point “Ring and Ball”, in accordance with PN-EN 1427.
- Fraass breaking point, in accordance with BS EN 12593.

To complement the analysis, the Authors determined the penetration index (PI) and temperature range of plasticity (TZP [°C]) based on the test results of penetration at 25°C, the softening point and breaking point using the formulas [3, 5]:

$$PI = \frac{20 \cdot T_{PIK} + 500 \cdot \lg P - 1952}{T_{PIK} - 50 \cdot \lg P + 120} \quad (1)$$

where:  $T_{PIK}$  – softening point, °C,  $P$  – penetration grade at 25°C,  $10^{-1}$  mm.

$$TZP = T_{PIK} - T_{lam} \quad (2)$$

where:  $T_{PIK}$  – softening point „Ring and Ball”, °C,  $T_{lam}$  – Fraass breaking point, °C.

## 3. Results

### 3.1. Penetration at 25°C

The results of penetration for all samples are shown in Figure 1.

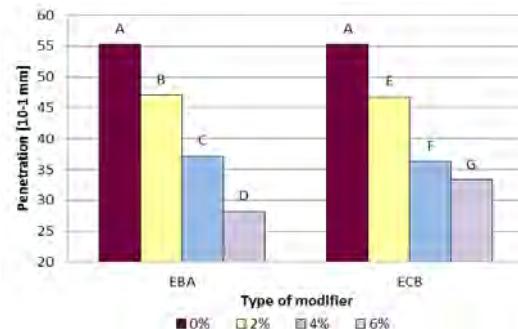


Fig. 1. Penetration value at 25°C

As seen above, both polymers decrease the value of penetration from  $55 \cdot 10^{-1}$  mm (base binder “A”) to  $28 \cdot 10^{-1}$  mm (EBA) and  $33 \cdot 10^{-1}$  mm (ECB). In the concentration range between 2% and 6%, the EBA polymer gives a nearly linear response in decreasing the penetration. The ECB additive acts very similarly until added in the highest concentration, when it shows to be less effective, giving a strong non-linear relationship.

### 3.2. Softening point, “Ring and Ball” method

The results of softening point designation for all samples are shown in Figure 2.

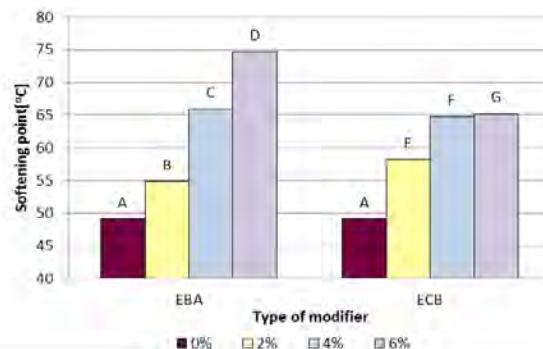


Fig. 2. Softening point, “Ring and Ball” method results

Considering the softening point of the modified bitumen, both polymers clearly increase the softening point temperature. The EBA modification is effective even in the concentration of 6% when it changes the softening point from 49°C to 75°C. The difference in the measured parameter for the ECB modification in concentrations of 4% and 6% is negligible (64°C and 65°C respectively), showing again a non-linear response.

### 3.3. Ductility

The introduction of the polymers caused visible decrease in ductility of tested specimens and increase in the peak measured force. The addition of 2% of the EBA polymer resulted in a change of ductility from ~1370 mm to ~407 mm. The further modification of the asphalt resulted in a reduction of ductility approximately by half for every 2% of the polymer added.

The tests conducted using the ECB polymer show that in low concentrations (2%) it has a smaller effect on the ductility of the 50/70 asphalt (decreasing it to 767 mm), but when added in amounts of 4% and 6%, the ductility decreases to 239 mm and 174 mm respectively.

The results of ductility tests are shown in Figure 3.

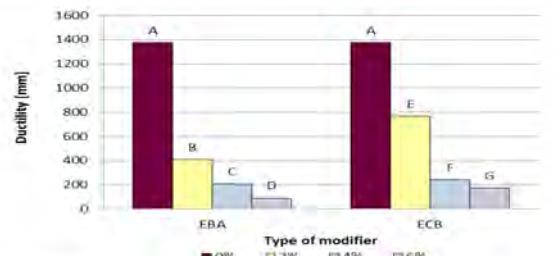


Fig. 3. Ductility

#### 3.4. Fraass breaking point

Based on the research it can be concluded that the use of both additives has a small impact on the raise of the breaking point. The change of this parameter is not significant enough to be considered as if the EBA and the ECB had a negative impact on the cracking surface at low temperatures.

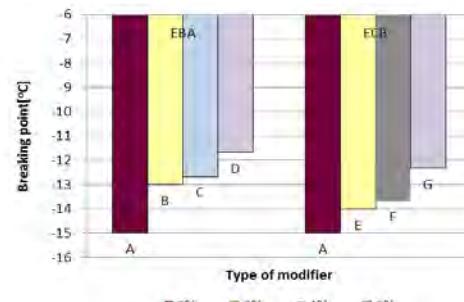


Fig. 4. Fraass breaking point value

#### 3.5. Penetration index and temperature range of plasticity

To complement the analysis, the values of the penetration index and temperature ranges of plasticity of all tested specimens were calculated according to the formulas (1) and (2). The results are shown in Figures 5 and 6.

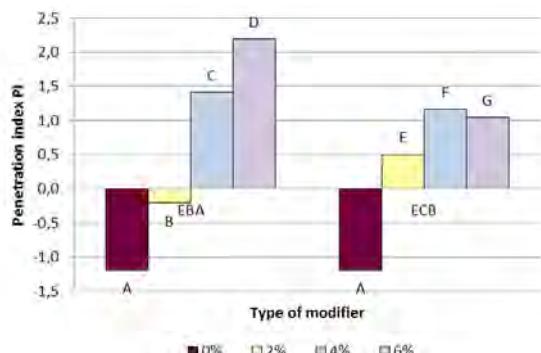


Fig. 5. Penetration index PI

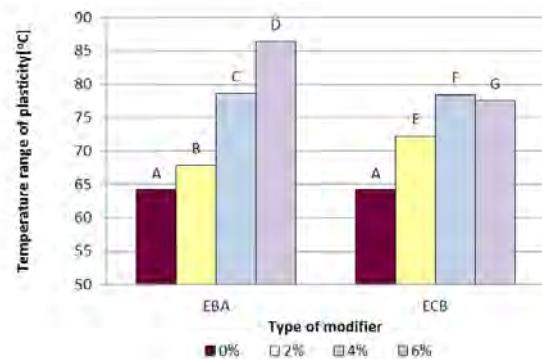


Fig. 6. Temperature range of plasticity

The computed results of penetration index (PI) show that the addition of EBA and the ECB affects noticeably the vulnerability to temperature changes of tested specimens. For samples "C" and "D" the penetration index value exceeds 2 indicating a poor result. The penetration index of other samples is acceptable, fitting roughly in the range between -1 and +1 (desired values are between 0.5 and +1) [4]. The penetration index of ECB modified bitumen has acceptable values in all concentrations of the modifier.

Regarding the temperature range of plasticity (TZP) it can be concluded that the increase of the modifier content results in an increase of the temperature range in which the bitumen retains its viscoelastic properties. For the maximum content of the modifier (6%) TZP increases from 65°C to 86°C (sample "D" – EBA) and to 77°C (sample "G" – ECB).

#### 4. Conclusions

Based on the tests performed on the EBA and ECB modified 50/70 bitumen, the following conclusions can be drawn:

- In each of the quantitative variants of the used EBA and ECB modifiers, the penetration of bitumen is reduced in relation to the base 50/70 bitumen, with an increase in the softening point at the same time.
- Application of EBA and the ECB does not have a significant influence on the breaking point temperature of bitumen, which is consistent with the adopted plastomer definition.
- Both polymers have great effect on the ductility of the considered bitumen. The 2% modification results in a significant decrease of this parameter. At higher concentrations, the polymers cause further noticeable decrease in ductility, but relatively less dramatic.
- Performed modifications affect the temperature vulnerability of asphalt. In accordance with the

designated penetration index, better results were obtained for the ECB modified bitumen.

## References

- [1] Błażejewski K., Olszacki J., Peciakowski H., *Poradnik asfaltowy (Bitumen handbook)*. ORLEN Asfalt 2011.
- [2] Gaweł J., Kalabińska M., Piłat J., *Asfalty drogowe (Road bitumen)*. WKiŁ, Warszawa 2001.
- [3] Kalabińska M., Piłat J., Radziszewski P., *Technologie materiałów i nawierzchni drogowych (Technology of road materials and pavements)*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [4] Piłat J., Król J., Sarnowski M., *Ocena właściwości reologicznych asfaltów i asfaltów modyfikowanych stonowanymi w budownictwie drogowym (Assessment of rheological parameters of non-modified and modified bitumen used in road construction)*. Konferencja „Reologia – teoria, praktyka i zastosowanie”, Jachranka 24–26.10.2007, s 108–117.
- [5] Piłat J., Radziszewski P., *Nawierzchnie asfaltowe (Bituminous pavements)*. WKiŁ, Warszawa 2004.
- [6] Piłat J., Sarnowski M., Adamczewski G., *Badania lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych polimerami i kwasem polifosforowym (The research of binders and mineral-bituminous mixes modified with polymers and polyphosphoric acid)*. „Drogownictwo” 2009, 7, s. 224–231.

Krzysztof Maciejewski  
Piotr Ramiączek  
Anna Chomicz-Kowalska

## Wpływ zastosowania modyfikacji polimerami EBA i ECB na właściwości ponaftowego asfaltu drogowego 50/70

### 1. Wstęp

Gwałtowny wzrost natężenia ruchu samochodowego oraz równoczesny wzrost obciążenia na osie pojazdów wymusza stosowanie konstrukcji nawierzchni, które są coraz bardziej odporne na czynniki niszczące wywołane ruchem pojazdów. Poprawa jakości wykonanych nawierzchni drogowych uzyskiwana jest poprzez zastosowanie nowych technologii, stosowanie nowych materiałów oraz modyfikację już istniejących technologii i materiałów.

Wieloletnie badania dowodzą, iż duży wpływ na trwałość i jakość wykonanej nawierzchni wywiera jakość stosowanego lepiszcza. Wraz ze wzrostem wymagań stawianych konstrukcją nawierzchni, systematycznie zwiększano również wymagania dla asfaltów drogowych. Obecnie, aby spełnić rygorystyczne wymagania dla mieszanek mineralno-asfaltowych w szerokim zakresie temperatur, stosuje się modyfikację asfaltów drogowych [2, 6]. Pierwsze próby z zastosowaniem modyfikacji polimerami cechuje się na lata 50. XX w. [1]. Celem modyfikacji jest wydłużenie okresu eksploatacji oraz poprawa właściwości użytkowych dla mieszanek mineralno-asfaltowych. Wymaga to zwiększenia odporności mieszanek mineralno-asfaltowej na

deformacje trwałe, pękanie, zmęcenie, starzenie oraz oddziaływanie czynników zewnętrznych [2].

Modyfikacji asfaltów dokonuje się stosując m.in.: elastomery, plastomery żywice syntetyczne, granulat gumowy z utylizacji opon, asfalt naturalny [5]. Jednymi z najpopularniejszych modyfikatorów są plastomery, które charakteryzują się większym udziałem odkształcenia trwałego od elastomerów i zwiększoną sztywnością w wysokiej temperaturze, w porównaniu do asfaltu bazowego. Nie poprawiają właściwości niskotemperaturowych lepiszcza [2].

W badaniach wykorzystano dwa plastomery do modyfikacji lepiszcza drogowego 50/70, kopolimer etylen z akrylanem butylu (EBA) oraz kopolimeru etylenu z dodatkiem bitumu (ECB).

Kopolimer etylenu z akrylanem butylu (EBA) pośrednio znajduje zastosowanie do produkcji folii budowlanych oraz ogrodniczych, klejów termotopliwych, modyfikatorów barwiących do tworzyw sztucznych. Poprzez swoje właściwości związane z niską temperaturą zeszklenia oraz dobrymi właściwościami w niskich temperaturach zastosowanie znajduje również w modyfikacji tworzyw sztucznych oraz lepiszczy asfaltowych.

Kopolimer etylenu z dodatkiem bitumu (ECB) powszechnie zastosowanie znajduje w produkcji modyfikowanych pap bitumicznych, wodooodpornych membran oraz przy produkcji pokryć dachowych. Ze względu na zastosowanie dodatku specjalnego bitumu sięgającego do 50% można go łatwo wymieszać z asfaltem.

W artykule przedstawiono wyniki badań modyfikacji asfaltu drogowego z zastosowaniem polimerów ECB oraz EBA dokonując oceny jakości takiego asfaltu pod względem podstawowych parametrów.

## 2. Plan badań i metodologia

W badaniach jako materiał wyjściowy zastosowano asfalt drogowych 50/70. Jako modyfikatorów użyto polimerów EBA oraz ECB w ilościach 2%, 4% i 6% tworząc sześć asfaltów modyfikowanych:

- asfalt 50/70, oznaczony jako „A”,
- asfalt modyfikowany 50/70 + 2% EBA, oznaczony jako „B”,
- asfalt modyfikowany 50/70 + 4% EBA, oznaczony jako „C”,
- asfalt modyfikowany 50/70 + 6% EBA, oznaczony jako „D”,
- asfalt modyfikowany 50/70 + 2% ECB, oznaczony jako „E”,
- asfalt modyfikowany 50/70 + 4% ECB, oznaczony jako „F”,
- asfalt modyfikowany 50/70 + 6% ECB, oznaczony jako „G”.

W celu określenia wpływu zastosowanego modyfikatora oraz jego ilość na właściwości asfaltu drogowego 50/70 wykonano następujące badania:

- penetracja w temperaturze 25°C, zgodnie z PN-EN 1426,
- temperatura mięknienia według metody pierścienia i kuli, zgodnie z PN-EN 1427,
- ciągliwość w 25°C, zgodnie z PN85/C-04132,
- temperatura łamliwości wg Fraassa, zgodnie z PN-EN 12593.

W celu uzupełnienia analizy obliczono na podstawie wyników oznaczenia penetracji w temperaturze 25°C, temperatury mięknienia oraz temperatury łamliwości wartości indeksu penetracji PI oraz temperaturowy zakres plastyczności TZP korzystając ze wzorów 1 oraz 2 [3, 5]:

## 3. Wyniki badań

### 3.1. Penetracja

Zmiany penetracji w zależności od ilości oraz rodzaju użytego modyfikatora przedstawiono na rysunku 1.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, iż polimer EBA powoduje zmniejszenie penetracji lepiszcza „A” z  $55 \cdot 10^{-1}$  mm do  $28 \cdot 10^{-1}$  mm dla asfaltu „D”. Dodanie modyfikatora ECB również powoduje zmniejszenie się wartości penetracji, dla asfaltu „G”  $33 \cdot 10^{-1}$  mm.

### 3.2. Temperatura mięknienia

Zmiany temperatury mięknienia w zależności od ilości oraz rodzaju użytego modyfikatora przedstawiono na rysunku 2.

Wpływ obu modyfikatorów zauważalny jest również w wynikach badania temperatury mięknienia. Wraz ze wzrostem ilości stosowanego modyfikatora następuje zmiana wartości temperatury mięknienia z 49°C dla „A” do odpowiednio dla lepiszcza „D” 75°C oraz „G” 65°C.

Przebieg zmian obu parametrów (penetracji oraz temperatury mięknienia) świadczy o tym, iż zastosowanie EBA oraz ECB powoduje zwiększenie się twardości asfaltu w stosunku do lepiszcza bazowego, a zarazem zmniejszenie podatności na rozmiękanie, deformacje oraz zniszczenia nawierzchni wywołane wysokimi temperaturami.

### 3.3. Ciągliwość

Modyfikacja badanych asfaltów polimerami w sposób widoczny wpłynęła na zmniejszenie ich ciągliwości oraz wzrost rejestrowanej siły. Modyfikacja polimerem EBA w wielkości 2% spowodowała ponad dwukrotny spadek tego parametru. Badanie wyższych koncentracji tego środka wykazało zależność spadku ciągliwości o 50% na każde kolejne 2% polimeru.

Modyfikator ECB w stężeniu 2% ma mniejszy wpływ na badany parametr (spadek ciągliwości niemal o połowę). Największy efekt w stosunku do ilości użytego środka obserwuje się dla zawartości 4% polimeru, kiedy to zmierzona wartość ciągliwości wynosi 239 mm (dla asfaltu niemodyfikowanego – 1370 mm).

### 3.4. Temperatura łamliwości według Fraassa

Wyniki oznaczenia temperatury łamliwości według Fraassa przedstawiono na rysunku 3. Na podstawie badania można stwierdzić, iż zastosowanie obu dodatków w nieznaczny sposób wpływa na podniesienie wartości temperatury łamliwości. Zmiana tego parametru nie jest jednak aż tak duża, aby można było uznać, iż EBA oraz ECB wpływają negatywnie na spękania nawierzchni w niskich temperaturach.

### 3.5. Indeks penetracji i temperaturowy zakres plastyczności

Obliczone według wzoru (1) i (2) wartości indeksu penetracji oraz temperaturowy zakres plastyczności asfaltu 50/70 modyfikowanego EBA oraz ECB przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

Porównując wyniki otrzymane z obliczenia indeksu penetracji PI można stwierdzić, iż dodatek EBA oraz ECB wpływa na zmiany wrażliwości temperaturowej. Dla asfaltu „C” oraz „D” wartość indeksu penetracji przekracza 2, co jest wynikiem zdecydowanie niekorzystnym. Dla pozostałych lepiszczy wartość wskaźnika przyjmuje korzystne wartości w przedziale –1 do +1 (zalecane –0,5 do +1) [4]. Dla modyfikacji ECB indeks penetracji przyjmuje korzystne wartości dla wszystkich zastosowanych koncentracji modyfikatora.

Analizując temperaturowy zakres plastyczności TZP można stwierdzić, iż wraz ze wzrostem zawartości dodatków modyfikujących zwiększa się zakres temperatur, w których asfalt zachowuje właściwości lepkospłejzające. Dla asfaltu bazowego „A” TZP wynosi 65°C, dla maksymalnych zawartości modyfikatora wartości wynoszą odpowiednio „D” 86°C oraz „G” 77°C.

### 4. Wnioski

Na podstawie wykonanych badań asfaltu drogowego 50/70 z dodatkiem EBA oraz ECB można sformułować następujące wnioski:

- w każdym z zastosowanych wariantów ilościowych zastosowanie modyfikatorów EBA oraz ECB powoduje zmniejszenie penetracji w stosunku do asfaltu wyjściowego 50/70 przy jednoczesnym zwiększeniu wartości temperatury miękknienia;
- zastosowanie EBA oraz ECB nie wywiera znacznego wpływu na wartość temperatury łamliwości asfaltu, co zgodne jest z założonym działaniem plastomeru;
- zastosowanie obu środków ma duży wpływ na ciągliwość badanego asfaltu. Już dodatek 2% polimerów skutkuje bardzo znaczącą zmianą tego parametru;

Badane modyfikacje asfaltów wpływają na ich po- datność na działanie temperatury. Dodatek 2% obu polimerów powoduje spełnienie wymagań w zakre- sie indeksu penetracji. Wraz ze wzrostem zawartości modyfikatorów zwiększa się zakres, w których bada- ne asfalty zachowują właściwości lepkospłejzające.

MATEUSZ M. IWANSKI<sup>1</sup>  
ANNA CHOMICZ-KOWALSKA<sup>2</sup>  
Kielce University of Technology  
<sup>1</sup>e-mail: mateusz.iwanski@tu.kielce.pl  
<sup>2</sup>e-mail: akowalska@tu.kielce.pl

# INFLUENCE OF SYNTHETIC FIBRES ON THE PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE PRODUCED AT REDUCED TEMPERATURE

## Abstract

This paper presents the effects of synthetic fibers from car tire recycling on the properties of binder course asphalt concrete. The asphalt concrete was produced in conventional hot mix asphalt technology as well as in lowered temperatures as warm mix (WMA) and half-warm mix asphalt (HWMA). The aim of the research was to analyze the influence of fiber content and the production technique on the air void content, moisture resistance (ITSR), resistance to permanent deformation ( $WTS_{AIR}$ ), stiffness modulus at 20°C and fatigue resistance under indirect tension test. The performed analyses have proven the influence of synthetic fibers on the characteristics of asphalt concrete produced in WMA technology (with synthetic F-T wax modified bitumen) and HWMA technology (with foamed bitumen) to be significant.

**Keywords:** synthetics fibers, asphalt concrete, foamed bitumen, WMA, HWMA, reduced temperature

## 1. Introduction

The dynamic increase in traffic and the rising share of heavy goods vehicles in its structure are the reasons for the rise of new requirements for road structure design and development for new road materials so that those new challenges can be met.

The structure of a road surface must bear increasing loads, so the fatigue resistance of materials (especially those for wearing course layers) has to be improved [10]. The processes associated with the production of those materials are highly energy intensive. Bitumen road construction materials are produced at temperatures ranging from 160°C to 180°C (depending on the bitumen type used), which is a source of wide critique throughout the world because of the negative impact on the environment. Low carbon dioxide emission processes are preferred to reduce the greenhouse effect and research have been carried out to lower the mineral-bitumen mix production temperatures [4, 5, 7, 8, 9, 12]. A new warm mix asphalt (WMA) technology was developed to lower the production temperatures by 20°C to 30°C. However this decrease does not allow to achieve the expected environmental effects in emission reduction. To resolve this problem,

studies are performed to implement the half warm mix asphalt technology which permits the production of the mineral-bitumen mix at ca. 100°C, resulting in up to 80°C temperature reduction.

Another important issue in modern road engineering is the problem of recycling. Cold recycling of asphalt pavements with the use of bituminous emulsion and foamed bitumen binder is widely used [1, 2, 3, 6]. New structural materials, in which recycled substances from other branches of industry could be used, are under development. In this way, waste materials which are a product of almost any production industry instead of being stored could be incorporated into road structure. What is more, new strict environmental regulations are inducted, according to which every existing actions and future developments must realize criteria of: economic efficiency, environmental protection and safety of human health.

The idea of recycling in civil engineering has recently flowered under the slogan of "Environmentally Friendly Roads". One of the ways to realize this goal is by the use of worn tires, which due to increasing wheel transport and increasing quantities of this

Table 1. Properties of base 35/50 bitumen and the 35/50 F-T wax modified bitumen (3% modification)

Characteristic	Unit of measurement	Test method	Binder	
			35/50	35/50+3.0% F-T
Penetration grade at 25°C	0.1 mm	EN 1426	41	29
Ring and Ball temperature	°C	EN 1427	55.6	72.5
Breaking point temperature	°C	EN 12593	-8	-6

waste, are difficult to dispose or to store [11]. Besides the techniques that use tires as a whole and so called energy recycling (heat recovery during combustion of rubber) are available. A new innovative solution to this problem is to use the ground tire cord. This technology is meant to provide fibers with an addition of rubber granules by grinding whole tires. The introduction of such a material into mineral-bitumen mixes creates a possibility of achieving a pavement with increased durability, rubber modification of the binder and improvement of the mix' rheological characteristics.

Recently, the fiber acquired from processing of the textile tire cord has become especially appealing. This material is composed of synthetic polymer fibers approximately 30 mm long accompanied by rubber granules (40% by mass) characterized by granulation below 8 mm.

Taking those properties into account, the introduction of the recycled tire material may have a significant effect on the characteristics of asphalt concrete produced at lowered temperature range of production and paving. By combining the waste material – recycled tires – and production of the mineral-bitumen mix at lowered temperatures, it may be possible to increase the durability of asphalt concrete along with a significant decrease in the environmental impact of the bituminous pavements.

## 2. Asphalt concrete mix design

The evaluation of the impact of synthetic fibers and production technology (HMA, WMA, HWMA) was conducted on asphalt concrete mix for binder course layer under traffic load KR3 – KR4. The asphalt concrete mix was designed according to technical guidelines WT-2 2010 [13]. The fiber additive was composed of 20% rubber granules and 80% fibers. One of the effects of the presence of rubber is an increase in fatigue resistance of the asphalt concrete.

### 2.1. Properties of the bitumen

In the laboratory investigations for the asphalt concrete in the conventional HMA technology for binder course layer according to guidelines WT-2 2010 [13] and European standard EN 13108-1, the 35/50

bitumen was used. For the use in the WMA technology, the bitumen was modified with synthetic Fisher-Tropsh wax (3% content in relationship to the binder). For the HWMA the bitumen was additionally foamed. The modifier used in the research (F-T wax) is an odor-free, granular, milk-like color substance, solidifying at the temperature range from 70 to 100°C. One of the properties of the F-T wax that permit production of asphalt concrete at lower temperatures, is the fact that it decreases the viscosity of bitumen. Selected properties of the base 35/50 bitumen and the 35/50 F-T wax modified bitumen are presented in Table 1.

The synthetic F-T wax is a hard-crystalline long chain aliphatic-polymer paraffin obtained in coal gasification. It is produced by heating coal or natural gas up to 280°C in a presence of catalyst. During this process, the wax solidifies in a form of regular disjointed bars. This form provides the structure that increases the viscosity of bitumen in operation temperatures of a bitumen pavement, which increases its resistance to permanent deformations.

The HWMA technology with foamed bitumen has been under rapid development since the first decade of XXI century. The fundamental parameters of foamed bitumen that decide about its usefulness for this technology, are the expansion ratio (ER) and half-life time ( $t_{1/2}$ ). Those parameters are conditioned, among other things, by the initial temperature of the binder (before foaming) and the amount of foaming water. The characteristics of the foamed 35/50 bitumen modified by 3% content of F-T wax are shown in Figure 1.

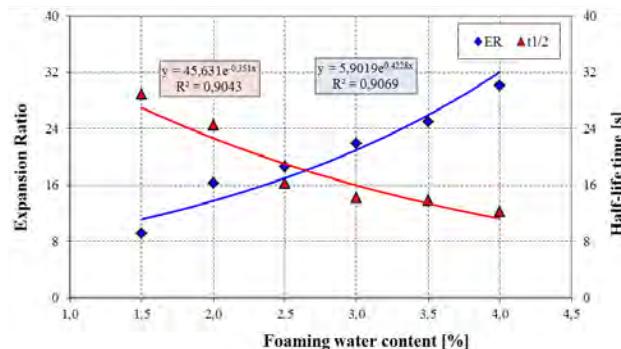


Fig. 1. Characteristics of foamed 35/50 bitumen (with 3% F-T wax content)

Optimum foaming water content of FWC = 2.5% was determined based on the relationship shown in figure 1. The obtained bitumen foam parameters at this point were: ER = 18.6 and  $t_{1/2} = 16.3$  s.

## 2.2. Mix design procedure

The binder course asphalt concrete (AC 16 W) mineral-bitumen mix for KR3 – KR4 traffic load was designed according to European standard EN 13108-1 and technical guidelines WT-2 2010 [13]. The general composition of the mineral mix (MM) is presented in table 2. The grading of the designed mineral mix for the asphalt concrete is presented in Table 3 and Figure 2.

Table 2. The composition of the mineral mix for asphalt concrete AC 16 W

Materials	MM [%]
Limestone, granulated 16/22	15.0
Limestone, granulated 8/16	20.0
Limestone, granulated 2/8	20.0
Lime crushed sand 0/2	26.0
Reclaimed asphalt pavement	15.0
Lime filler	4.0
Total	100.0

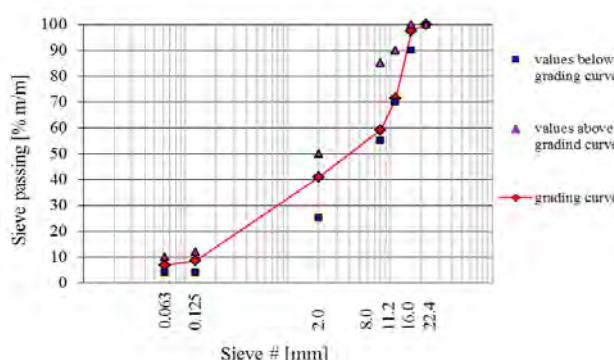


Fig. 2. The designed mineral mix for the asphalt concrete AC16 W

Table 3. Mineral mix grading for the AC16 W

Sieve # [mm]	0.063	0.125	0.25	0.50	2.0	4.0	8.0	11.2	16.0	22.4
Content [%]	6.9	8.5	13.7	21.2	40.9	49.4	59.1	71.3	97.4	100.0

The control mix used to verify the findings was an asphalt concrete mix with 35/50 bitumen (4.8% binder content according to WT-2 2010 [13]) produced in HMA technology (label: M0). Four different types of mineral-bitumen mixes at lowered production temperatures (labels: M1, M2, M3, M4) were designed for the experiment. The mixes differed in synthetic fiber content (0.3% and 0.6%) and in

bitumen binder content. The mixes M1 and M2 were produced in warm technology and the M3 and M4 samples were produced as half warm mixes with the use of foamed bitumen. The binder used for all samples produced at lowered temperatures (WMA, HWMA) was a 35/50 bitumen modified by 3% addition of F-T wax. To achieve required void ratio, it was necessary to increase the binder content up to 5.3%. This was a result of more difficult compaction conditions at lower temperatures and the presence of the introduced fibers. Table 4 presents the contents of bituminous binder and synthetic fibers in the designed mixes, relating to the production method.

Table 4. Bituminous binder and synthetic fiber content in the designed asphalt concrete mixes

Mix signature	Production technology	Bitumen type	Bitumen content [%]	Fiber content [%]
M0	HMA	35/50	4.8	-
M1	WMA	35/50 + 3.0% F-T	4.8	0.3
M2	WMA	35/50 + 3.0% F-T	4.8	0.6
M3	HWMA	35/50 + 3.0% F-T	5.3	0.3
M4	HWMA	35/50 + 3.0% F-T	5.3	0.6

## 3. Results and discussion

A set of parameters were determined (according to guidelines WT-2 2010 [13] and EN 13108-1) to analyze the influence of the synthetic fiber content and the production technique (HMA, WMA, HWMA) on the characteristics of the asphalt concrete mix for binder course layer (AC 16 W) under traffic load KR3 - KR4. These parameters were:

- air void content ( $V_m$ ),
- moisture damage resistance, according to WT-2 2010 (Appendix 1) and EN 12697-12, based on:
  - indirect tensile strength of wet ( $ITS_w$ ) and dry ( $ITS_d$ ) samples,
  - indirect tensile strength ratio (ITSR),
- resistance to permanent deformation (rutting test in small apparatus, method B in air), according to EN 12697-22 (WTSAIR),
- stiffness modulus in an indirect tensile test (IT-CY) at 20°C, according to EN 12397-26 (Appendix C),
- fatigue resistance in an indirect tensile test (IT-FT), according to EN 12697-24 (Appendix E).

The authors did not observe any negative effect of the introduced fibers on the coating of aggregate by the binder during the asphalt concrete mix production in both WMA and HWMA techniques. What is more, the synthetic fibers were dispersed evenly and correctly during the production and compaction of all the

a)



b)



Fig. 3. Inner structure of Marshall samples – asphalt concrete with synthetic fiber content of 0.6% produced in: a) WMA technology with 4.8% binder content, b) HWMA technology with 5.3% binder content

samples. The example of achieved Marshall samples' inner structure in warm and half warm techniques with the synthetic fibers content of 0.6% is presented in Figure 3.

Average values for air void content in the asphalt concrete related to the type of production technology are shown in Figure 4.

$V_m$  [%]

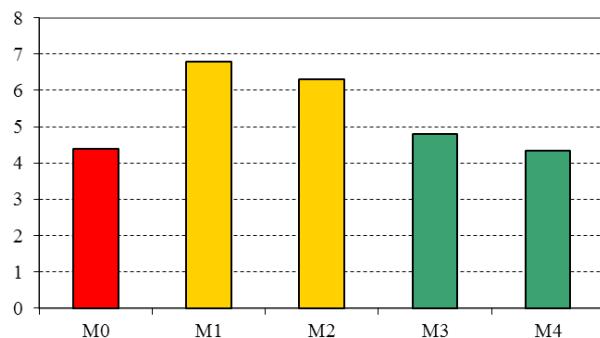


Fig. 4. Air void content in the asphalt concrete AC 16 W related to the type of production technology

The analysis of results, shown in Figure 4, leads to a conclusion that the highest air void contents were observed in samples produced in WMA technology (M1 and M2). Air void contents of HWMA samples are comparable to those obtained from control mixes (M0). This is a result of increased share of the bituminous binder in mixes M3 and M4. The introduction of synthetic fibers in the amount of 0.6%

led to the lowest air void content ( $V_m = 4.35\%$ ). It must be clearly stated that all investigated mixes have met the requirements for air void content according to WT-2 2010 (required values: 4.0 – 7.0%).

Indirect tension tests were conducted to assess the moisture damage resistance of the designed asphalt concretes. The average results of dry samples ( $ITS_d$ ) and samples conditioned in water and frost ( $ITS_w$ ) are presented in Figure 5. The indirect tensile strength ratios obtained for the concretes are given in Figure 6.

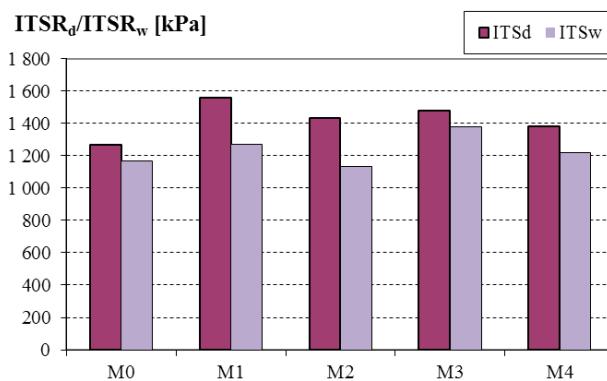


Fig. 5. Indirect tensile strengths of asphalt concrete AC 16 W samples depending on the production process: dry samples ( $ITS_d$ ) and samples conditioned in water and frost ( $ITS_w$ )

ITSR [%]

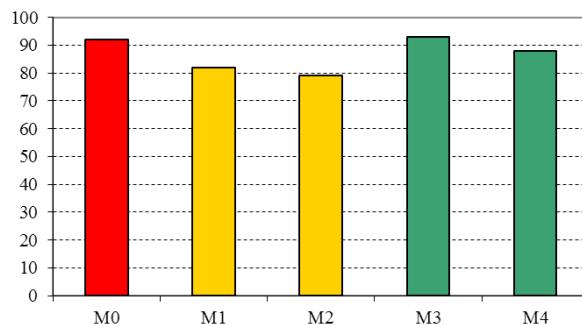


Fig. 6. Moisture damage resistance of asphalt concrete AC 16 W depending on the production process

The obtained results suggest that asphalt concrete M1 has the highest indirect tensile strength after dry conditioning. Results for the M2 mix and HWMA foamed bitumen mixes (M3 and M4) were comparable to those of M1. As for the  $ITS_w$  parameter measured after conditioning in water and frost: best results were recorded for the M3 asphalt concrete, but the performance of M4 and M1 mixes were comparable.

The highest resistance to moisture damage (measured by the ITS<sub>R</sub> parameter) was recorded for HWMA asphalt concrete with foamed bitumen and 0.3% synthetic fiber content. Similar results were obtained for M4 asphalt concrete with 0.6% fiber content. The superior performance of HWMA concretes in this domain is an effect of increased binder content which improves the moisture damage resistance. It is worth noting that the WMA M1 asphalt concrete yielded a lower ITS<sub>R</sub> ratio than the M0 control mix and according to technical guidelines WT-2 2010 it was on the limit ( $ITS_R \geq 80$ ) of filling this criterion. The M2 mix did not meet the requirements ( $ITS_R = 79\%$ ).

Another important parameter in the assessment of pavement durability is its resistance to permanent deformations measured by the rate of rut development  $WTS_{AIR}$  (Fig. 7).

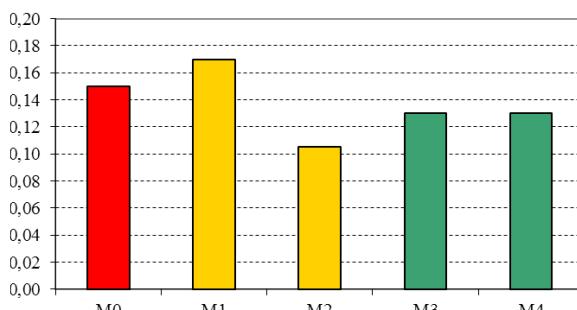
 $WTS_{AIR}$  [mm/ $10^3$  cykli]

Fig. 7. Permanent deformation resistance of asphalt concrete AC 16 W in relation to production technique – proportional rut development  $WTS_{AIR}$  [mm/ $10^3$  cycles]

Based on the test results presented in Figure 7 it can be stated that the WMA M2 asphalt concrete with 0.6% fiber content was the most resistant one to permanent strain development. The test outcome was  $WTS_{AIR} = 0.105$  mm/ $10^3$  cycles. The HWMA samples: M3 and M4 resulted to perform slightly worse, with the  $WTS_{AIR}$  parameter ranging from 0.1 to 0.12 mm/ $10^3$  cycles. The M1 asphalt concrete shown to be the least resistant to rutting. However, in terms of the requirements ( $WTS_{AIR} \leq 0.3$  mm/ $10^3$  cycles according to [13]) all tested specimens, regardless of the amount of synthetic fibers used and production technique, yielded to be resistant to rutting.

The fundamental parameter reflecting the mechanical properties of asphalt concrete is the stiffness modulus which is the primary material characteristic used in the mechanistic pavement design. The results for stiffness modulus are presented in Figure 8 and the fatigue damage of assessed materials is shown in Figure 9.

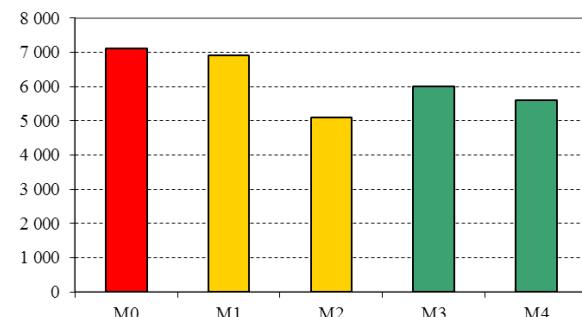
 $S_m$  (IT-CY) [MPa]

Fig. 8. Stiffness moduli of asphalt concrete, measured in indirect tensile test in relations to production technology

The results of stiffness modulus, measured in indirect tension test, which are presented in Figure 8, show that the conventional HMA M0 control samples yielded highest stiffness moduli at a value of 7131 MPa. Comparable results were obtained for the WMA M1 asphalt concrete samples containing 0.3% addition of synthetic fibers. The use of HWMA technology implied the decrease in the stiffness modulus of 1000 to 1500 MPa in relation to the control asphalt concrete. Also it can be stated that an increase of the synthetic fiber content in asphalt concrete mix results in a decrease of stiffness modulus measured in indirect tension test.

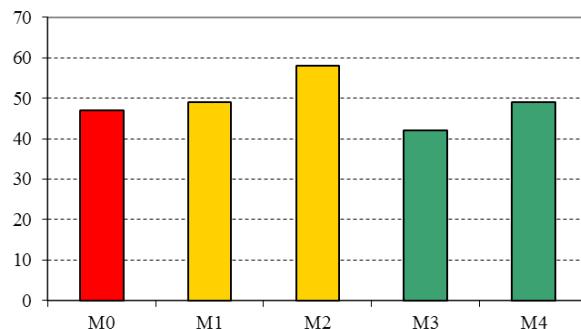
**S<sub>m</sub> (IT-FT) [%]**


Fig. 9. Fatigue damage of asphalt concrete, measured in indirect tensile test in relations to production technology

The performed analyses show that both factors: the amount of bitumen and synthetic fibers, influence the durability of asphalt concrete measured by a decrease of stiffness modulus in initial phase of fatigue testing according to IT-FT method. The increase of fiber content in asphalt concrete mixes has a positive effect on the magnitude of fatigue, which was observed best in M2 samples with 0.6% fiber content

#### 4. Conclusions

Based on the performed investigations, the following conclusions were drawn:

- there are potential possibilities for the use of synthetic fibers from tire recycling in the technology of asphalt concrete,
- synthetic fibers have a significant influence on the investigated properties of asphalt concrete produced at lowered temperatures (WMA and HWMA with foamed bitumen),
- positive influence of the synthetic fiber on the rutting resistance was particularly observed in the M2 warm mix asphalt concrete and half warm mix asphalt concretes with foamed bitumen (M3 and M4 which had air void contents similar to HMA control samples),
- the use of a fiber from worn tire cord may be a promising application which could contribute to disposing of this waste material and protecting the environment,
- the results presented in this paper show that those fibers can be used in WMA and HWMA production of asphalt concrete but further investigations are needed to clearly assess the influence of this material on the parameters of asphalt concrete and its performance in field tests.

#### References

- [1] Iwański M.: *Podbudowa z asfaltem spieniony*. Drogownictwo 3, 2006, s. 97-106.
- [2] Iwański M., Chomicz A.: *Przydatność stosowanych w Polsce asfaltów do spieniania*. Drogownictwo 8, 2006 s. 267–27.
- [3] Iwański M., Chowicz-Kowalska A.: *Właściwości recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym*. Drogownictwo Nr 9, 2011, s. 271–277.
- [4] Iwański M., Mazurek G.: *Synthetic Wax Effect on the Resilient Stiffness Modulus of Asphalt Concrete*. Road and Bridges No 3, Vol. 11. Warszawa, 2012, pp. 233–248.
- [5] Iwański M., Mrugała J.: *Beton asfaltowy w technologii na półciepło z asfaltem spienianym*. Drogownictwo Nr 4, 2013, s. 110–115.
- [6] Jenkins K.J., Collings D.C, Thesey H.L., Long F.M.: *Interim Technical Guideline Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials*. Edited by Les Sampson of Asphalt Academy. ISBN 0-7988-7743-6. Asphalt Academy, Pretoria, South Africa, 2003.
- [7] Judycki J., Stienss M.: *Badania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze otaczania – raport końcowy*, Politechnika Gdańsk, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Gdańsk 2011.
- [8] Judycki J., Stienss M.: *Mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło – przegląd dodatków*. Drogownictwo 7-8/2010, s. 227–232.
- [9] Król J., Matraszek K., Piłat J., Radziszewski P., Kowalski K.J.: *Właściwości lepiszczy asfaltowych modyfikowanych parafinami nowej generacji*. Projekt MMA – cz. 1, Autostrady, 5/2011, s. 72–76.
- [10] Piłat J., Radziszewski P.: *Nawierzchnie asfaltowe*. WKŁ, Warszawa 2010.
- [11] Sybilski D.: *Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie drogowym*. Przegląd budowlany 5/2009, s. 37–44.
- [12] Thorsten Butz: Warm Asphalt Mix – Technologies, Research and Experience, Sasol Wax GmbH. Warm Mix Asphalt technology, AASHTO standing committee on highways technical meeting, Nashville, 2005.
- [13] Wymagania techniczne – Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Mieszanki mineralno-asfaltowe (WT-2 2010). IBDiM, Warszawa 2010.

Mateusz M. Iwański  
Anna Chomicz-Kowalska

# Wpływ włókien syntetycznych na właściwości betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonej temperaturze

## 1. Wprowadzenie

Konstrukcja nawierzchni drogowej przenosi coraz to większe obciążenia. W związku z tym, niezbędne jest zwiększenie trwałości zmęczeniowej materiałów stosowanych do jej wykonania, a przede wszystkim wykorzystywanych do budowy asfaltowych warstw jezdnych [10]. Technologie związane z wykonawstwem tego rodzaju materiałów charakteryzują się dużą energochłonnością. Wytwarzane są one bowiem w temperaturze od 160°C do 180°C, która uzależniona jest od rodzaju asfaltu stosowanego do mieszanki mineralno-asfaltowej. Tego rodzaju technologie na całym świecie poddawane są krytyce, ponieważ wpływają negatywnie na środowisko naturalne. Dlatego też podjęto prace badawcze w drogownictwie w celu obniżenia temperatury wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej [4, 5, 7, 8, 9, 12]. Opracowano technologię pozwalającą zmniejszyć temperaturę jej produkcji i wbudowywania w konstrukcję nawierzchni drogowej o około 20-30°C, którą nazwano technologią na ciepło (WMA – Warm Mix Asphalt). Prowadzone są również badania oraz prace wdrożeniowe dotyczące technologii na półciepło (HWMA – Half Warm Mix Asphalt), która pozwala wytwarzać mieszankę mineralno-asfaltową w temperaturze około 100°C.

Również bardzo istotnym współczesnym problemem jest stosowanie recyklingu w drogownictwie. Dość powszechnie stosowana jest technologia recyklingu na zimno konstrukcji nawierzchni z wykorzystaniem jako lepiszcza emulsji asfaltowej lub asfaltu spienionego [1, 2, 3, 6].

Technologie recyklingu szczególnie silnie rozwijają się ostatnio w budownictwie, gdzie między innymi wykorzystuje się zużyte opony, których składowanie staje się coraz poważniejszym problemem z uwagi na dynamiczny rozwój motoryzacji i wzrost liczby pojazdów [11]. Technologia wykorzystująca zmielony kord z opon samochodowych ma na celu uzyskanie

z opony włókien z dodatkiem granulatu gumowego. Wprowadzenie takiego włókna do mieszanki mineralno-asfaltowych stwarza potencjalne możliwości m.in.: uzyskania nawierzchni o podwyższonej trwałości, modyfikacji lepiszcza obecną w dodatku gumą oraz poprawę właściwości reologicznych mieszanki.

Szczególnie interesujące jest ostatnio pozyskiwanie włókno powstałe z przeróbki kordu tekstylnego opon składające się z syntetycznych włókien polimerowych o długości około 30 mm. Ponadto w materiale włóknistym występuje granulat gumowy w ilości 40% (m/m) o uziarnieniu do 8 mm.

W związku z tym, połączenie wykorzystania materiału odpadowego – recyklowanych opon samochodowych oraz technologii produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej w obniżonej temperaturze może przyczynić się do podwyższenia trwałości betonu asfaltowego oraz znacznej ochrony środowiska.

## 2. Projekt betonu asfaltowego

Oceną wpływu włókien syntetycznych oraz technologii wytwarzani (HMA, WMA, HWMA) wykonano dla betonu asfaltowego przeznaczonego na warstwę wiążącą konstrukcji nawierzchni obciążonej ruchem KR 3-4. Beton asfaltowy zaprojektowano zgodnie z Wytycznymi Technicznymi WT-2 z 2010 roku [13]. Zastosowany dodatek włóknisty zawiera w swoim składzie około 20% granulatu gumowego. Obecność gumy powoduje m.in. podwyższenie trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowego.

## 2.1. Właściwości betonu asfaltowego

W badaniach laboratoryjnych do mieszanki betonu asfaltowego wytwarzanej w tradycyjnej technologii na gorąco przeznaczonej na warstwę wiążącą nawierzchni obciążonej ruchem KR 3-4 zgodnie z Wytycznymi WT-2 2010 [13] oraz PN-EN-13108-1 „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania. Część 1: Beton asfaltowy” zastosowano asfalt 35/50. Asfalt ten w celu wykorzystania go w technologii WMA

modyfikowany był woskiem syntetycznym F-T (Fisher-Tropsha) w ilości 3% w stosunku do masy lepiszcza. Natomiast w celu zastosowania go w technologii HWMA poddany był dodatkowo procesowi spieniania (rys. 1).

Na podstawie przedstawionej zależności ustalono optymalną zawartość wody spieniającej na poziomie FWC = 2,5% (Foaming Water Content), przy której pianka asfaltowa cechuje się następującymi parametrami: WE = 18,6 i t1/2 = 16,3s.

## 2.2. Projekt mieszanki mineralnej

Mieszanka mineralna betonu asfaltowego na warstwę wiążącą (AC 16 W) nawierzchni obciążonej ruchem KR 3-4 zaprojektowana została zgodnie z normą PN-E-13108-1 oraz Wytycznymi WT-2 2010 [13]. Skład ramowy mieszanki mineralnej (MM) zestawiono w tabeli 2. Uziarnienie zaprojektowanej mieszanki mineralnej betonu asfaltowego zestawiono w tabeli 3 oraz graficznie przedstawiono na rysunku 2.

## 2.3. Projekt mieszanki mineralno-asfaltowej

W badaniach laboratoryjnych kontrolną mieszankę stanowił beton asfaltowy wytwarzany w tradycyjnej technologii na gorąco (M0), w którym stosowano asfalt 35/50. Następnie zaprojektowano 4 rodzaje mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonych temperaturach wytwarzania (M1, M2, M3, M4), które zawierały włókna syntetyczne w ilości 0,3% i 0,6% oraz różniły się zawartością lepiszcza asfaltowego. Mieszanki oznaczone symbolem M1 i M2 produkowano w technologii na ciepło, natomiast mieszanki M3 i M4 wytwarzano w technologii na półciepło z zastosowaniem asfaltu spienionego. W mieszankach o obniżonych temperaturach produkcji (WMA, HWMA) stosowano lepiszcze 35/50 z zawartością 3,0% modyfikatora F-T. Zawartość asfaltu w kontrolnej mieszance ustalono na poziomie 4,8% zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2 2010 [13]. Ze względu na niższą temperaturę wytwarzania mieszanki w technologii na półciepło wpływającą na pogorszenie warunków jej zagęszczania oraz dodatkowo ze względu na obecność materiału włóknistego w składzie betonu asfaltowego istniała konieczność stosowania większej ilości lepiszcza asfaltowego (5,3%) w celu uzyskania wymaganego poziomu zawartości wolnych przestrzeni. W tabeli 4 zestawiono zawartości lepiszcza asfaltowego oraz włókien syntetycznych w zaprojektowanych mieszankach betonu asfaltowego w zależności od stosowanej technologii ich produkcji.

## 3. Wyniki badań i ich analiza

W celu oceny wpływu włókien syntetycznych oraz technologii wytwarzania (HMA, WMA, HWMA) na zmiany właściwości betonu asfaltowego do warstwy wiążącej (AC 16 W) nawierzchni obciążonej ruchem KR 3-4 zgodnie z procedurami badawczymi przedstawionymi w Wymaganiach Technicznych WT-2 2010 [13] oraz PN-EN 13108-1 oznaczono:

- zawartości wolnych przestrzeni Vm (rys. 4),
- odporność na działanie wody na podstawie oceny:
  - wytrzymałości na pośrednie rozciąganie dla grupy próbek mokrych ITsw i suchych ITss (rys. 5),
  - wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITsr (rys. 6),
- odporność na powstawanie deformacji trwałych na podstawie pomiaru prędkości przyrostu kolejny w 60°C WTSair (rys. 7),
- moduł sztywności w schemacie pośredniego rozciągania (IT-CY) w temperaturze 20°C (rys. 8),
- odporność na zmęczenie metodą pośredniego rozciągania (IT-FT) (rys. 9).

W czasie wytwarzania betonu asfaltowego zarówno w technologii WMA, jak i HWMA z asfaltem spienionym, nie zaobserwowano negatywnego wpływu włókien syntetycznych na proces obtaczania lepiszem ziaren kruszywa mieszanki mineralnej. Włókna syntetyczne rozkładały się prawidłowo w czasie wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej oraz podczas procesu jej zagęszczania niezależnie od zastosowanej technologii, ich ilości oraz zawartości asfaltu. Widok struktury wewnętrznej próbek Marshalla z betonu asfaltowego wytwarzanego w technologii na ciepło i półciepło z zawartością 0,6% włókien syntetycznych przedstawiono na rysunku 3.

Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić istotny wpływ włókien syntetycznych zawartych w składzie betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonej temperaturze (WMA i HWMA) na analizowane jego właściwości. Szczególnie istotny jest wzrost odporności na powstawanie deformacji trwałych betonu asfaltowego wytwarzanego w technologii HWMA z asfaltem spienionym.

## 4. Wnioski

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- istnieją potencjalne możliwości wykorzystania włókien syntetycznych powstały w procesie recyklingu opon samochodowych w technologii betonu asfaltowego;

- włókna syntetyczne w istotny sposób wpływają na analizowane właściwości betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonej temperaturze, to jest w technologii WMA i HWMA z asfaltem spienionym;
- szczególnie korzystny jest wpływ włókien syntetycznych na odporność na kolejnowanie betonu asfaltowego M2 wytwarzanego w technologii WMA oraz betonu asfaltowego (M3 i M4) otrzymanego w technologii HWMA z asfaltem spienionym; przy czym beton asfaltowy M3 i M4 charakteryzuje się zawartością wolnych przestrzeni na poziomie kontrolnego betonu asfaltowego wytwarzanego w tradycyjnej technologii na gorąco;
- stosowanie włókna powstałego z kordu zużytych opon samochodowych do betonu asfaltowego może być istotną propozycją w znacznym stopniu przyczyniającą się do rozwiązania problemu utylizacji tego rodzaju materiału i wpływającą w istotny sposób na ochronę środowiska naturalnego;
- przedstawione w opracowaniu wyniki pozwalały stwierdzić, że wykorzystanie włókien może być rozszerzone o stosowanie ich w technologii wytwarzania betonu asfaltowego WMA lub HWMA. Niezbędne jest jednak wykonanie dodatkowych badań pozwalających na jednoznaczną ocenę wpływu włókien syntetycznych na właściwości betonu asfaltowego oraz jego pracy w konstrukcji nawierzchni w warunkach terenowych.





**environment**  
**environment**



MARTIN PEŠEK  
Brno University of Technology  
e-mail: m.pesek@email.cz

# THE INFRARED MEASUREMENT METHOD IN THE AIR IN SMALL CLOSED AREAS

## Abstract

The article is focused on the infrared measurement method in the air in small closed areas. This method is based on the visualization of temperature fields on an auxiliary material which is inserted into the non-isothermal air flow in a research area. In small closed spaces where it is impossible to put the measuring equipment due to various reasons, it is necessary to visualize the temperature fields through a window. This window must be permeable for infrared radiation of known properties, especially the transmissivity. As an auxiliary material for the visualization of temperature fields in these experiments, the ordinary office paper with high emissivity value was chosen and the viewing window was made of a polyethylene. The presented method for the measurement of temperature fields in the air can be applied mainly in closed spaces where it is difficult to situate the infrared camera (due to field of view), in spaces where the infrared camera restricts the flowing air or where it is aggressive or too hot environment (a potential damage of infrared camera), etc. In this article the parameter analysis, which is important for a particular application, is performed and an example of temperature fields measurement in closed space is presented. This method can be used in cooling and heating design of means of transport, mostly for cabins of cars and trucks.

**Keywords:** temperature field, infrared camera, small closed space, transmissivity

## 1. Introduction

The thermography is a technique for creating images for a noncontact measurement of temperature fields in many scientific disciplines by the very effective device – the infrared camera [1]. The camera detects surface temperatures and converts this information to an image which we can call as a thermogram. In the thermogram, the surface temperatures are indicated by different colours or shades. One huge advantage of an infrared camera usage is the monitoring speed [2]. This measuring technique provides almost immediately a visual image records and we can show the information in actual time for deeper knowledge of thermal states and processes in research areas. The thermography is being used mainly for determining surface temperatures, but this article tries to extend the possibilities of monitoring and the measurement of temperature fields in the air in small closed spaces through the viewing window.

Immediate knowledge of the distribution of temperature field in the airflow can allow to quickly

identify a possible problem in the design or adjustment of air conditioning or hot-air heating.

## 2. The measuring method description

It is impossible to make the air temperature visible directly by the infrared camera because the air is a transparent material in infrared radiation [3]. For visualization the air temperatures in non-isothermal air flows, an auxiliary material, which has to be inserted into airstreams, is necessary to be used. The hot airflow produces the convective heat transfer to the auxiliary material surface that changes the surface temperature which is measured through the surface temperature by the infrared camera [4]. The infrared camera is ordinary used for the non-contact measurement, but this explained method for measuring temperature field in the air is a contact method. For measuring temperature fields where the streamlines are situated parallelly to the auxiliary material, a spacious sheet of this material is suitable to be used.

The device for measuring temperature fields in a closed small space is compounded of the compact sheet of the auxiliary material which is situated at a right angle to the air-conditioning mouth outlet which serves airstreams to be visible into the space. The next part is the infrared camera on the tripod base stand in front of the window, which is made of the transmissive material. This window closes the inside environment (the small closed space) to the outside air in space where the measuring is done.

### 3. The determination of auxiliary material properties

For a proper usage of this measuring method, it is necessary to determine the temperature in the nonisothermal airstream using the planar office paper which serves the visibility of temperature fields. The next important support material is the polyethylene plastic foil which closes the small space to outside airstream noninfluence.

All measurements were performed by the infrared camera Jenoptik, type VarioCam that has the spectral sensitivity from 8 to 13  $\mu\text{m}$  with the resolution of 320 x 240 pixels. The radiation ambient temperature for all measuring was determined by the radiation thermometer Testo 830-T2 as the arithmetic average of surrounding radiation temperatures where the measuring was done.

#### 3.1. The emissivity determination of auxiliary material

The auxiliary material, on which the temperature field is visualized, must have suitable static properties, mainly high emissivity  $\epsilon$  [-] in order to maximize the accuracy and for noninfluence of ambient radiation temperature.

The emissivity of the auxiliary material for the suitable wavelength range of infrared camera VarioCam (8 to 13  $\mu\text{m}$ ) and for the investigated temperature range [5] by the infrared camera was measured. For this measuring it was necessary to determine the temperature from thermogram (with setting of emissivity of infrared camera to value 1), the sample surface temperature measured by the thermocouple and the radiation ambient temperature determined by the radiation thermometer. The emissivity of planar office paper was measured on heated samples in a cooler environment. The paper sheet was fixed to a steel plate. On the plate the calibrated thermocouple was placed, which measured the actual temperature (Fig. 1).

The resulting emissivity of the planar office paper 80 g/m<sup>2</sup> was calculated to the 0.96 value [6].

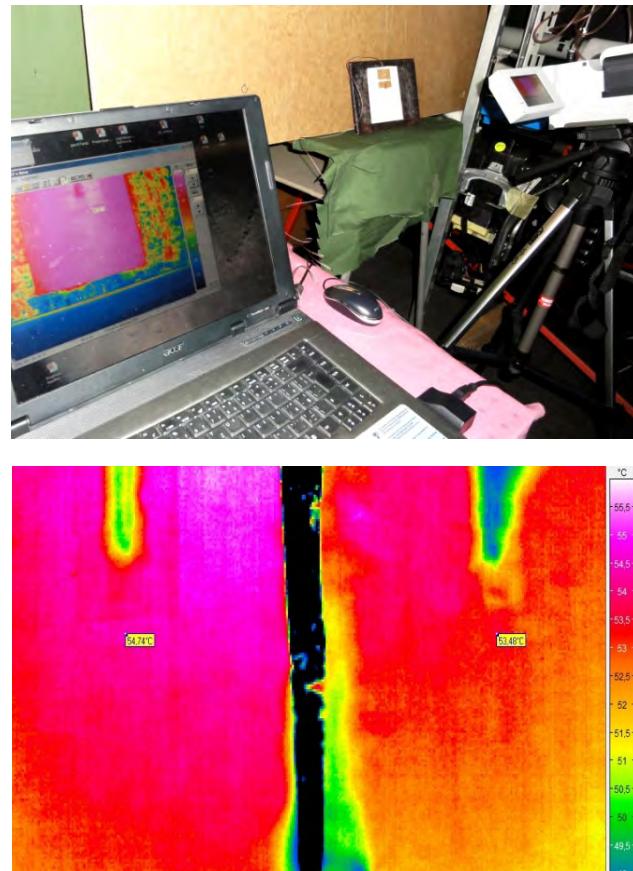


Fig. 1. The stand and the thermogram from the office paper emissivity measuring. The area 1 is a temperature measuring by thermocouple sensor and the area 2 is area of temperature measuring by thermovision

#### 3.2. The transmissivity determination of auxiliary material

For correct measuring of temperature fields in small closed spaces through a transparent material, the viewing window material properties is necessary to know. The main important property of transparent material is its transmissivity, the ability to transmit an infrared radiation that the infrared camera detects. The polyethylene foil, in a thickness 0.05 mm as the viewing material, was chosen. The polyethylene foil transmissivity for the suitable wavelength range was determined likewise by the same infrared camera. The resulting transmissivity of this polyethylene foil was calculated to the 0.90 value.

The transmissivity of polyethylene viewing window together with the emissivity of an auxiliary material, mean radiation temperature inside the small closed space and the mean radiation temperature in the outside space where the device is placed are crucial values that they have a major influence on the measurement. These values can be entered directly

into the infrared camera before the measurement of temperature fields, or subsequently after the measurement to Irbis Professional program.

#### 4. The measuring of temperature field in the car cabin

One of possible examples, where is possible to use the method of measurement of temperature fields in the air in small closed spaces through the transmissive material using an infrared camera, is the measuring in the car cabin. Measurements were carried out in a car of brand name Škoda. Specifically, it was the Octavia Combi II, 2.0 TDi with dual air conditioning. For the experiment the ventilation outlet of the center console for air conditioning of rear seat was chosen.

The size of auxiliary material was modified according to the geometry of the rear row of seats (Fig. 2). The geometric shape of the paper sheet has the shape of a rectangular trapezium with the bases of lengths of 60 and 80 cm and the height of 80 cm. The paper sheet was attached to the car cabin roof and the bottom was equipped by weights to its perfect plane balancing. The measuring of temperature fields was carried out by the left rear car door. The car glass window was rolled down into the door and the free visor was equipped by the polyethylene sheet for the closing the inside space from the space where the car was placed. The plastic foil on the door was attached by an adhesive tape.

The measurements were performed in the space with a homogeneous radiation temperature. The room was closed and the exhaust outlet was drained away from the room through a flexible air duct. The infrared camera was set up in front of the side door to the best view inside the car. Only the outlet for rear row of seats in a car was opened and from possible air conditioning modes only this outlet was selected (leg conditioning or windshield was not used). The value of the temperature to which the cabin should be air-conditioned was always set to the same value for the right and the left half of the car (duality of air conditioning was not used).

The infrared measuring was done in the infrared camera stable state and after the auto calibration of the camera. At the same time the radiating temperature in the car cabin and in the room were measured by the infrared thermometer Testo. The temperature fields were shown directly on the display of the infrared camera or on the display of connected laptop in Irbis Online program.



Fig. 2. The photo of air-conditioning mouth outlet for back row of seats in Škoda Octavia II and the photo of auxiliary material position before this mouth outlet

#### 5. Results

Temperature fields in the car cabin was scanned from several viewing angles and different distances of the infrared camera in front of the polyethylene window including the case the camera lens was pressed directly to the window of polyethylene (during the handheld measuring) to prevent the non-uniform picture of the outside environment which could be shown on the polyethylene window. In the handheld measuring also the polyethylene foil in viewing window at maximum stretch is ensured (Fig. 3). The measuring in several different settings of mouth outlet air flowing was done. The visualization of hot airflow (heating) and cool airflow (cooling) was recorded.

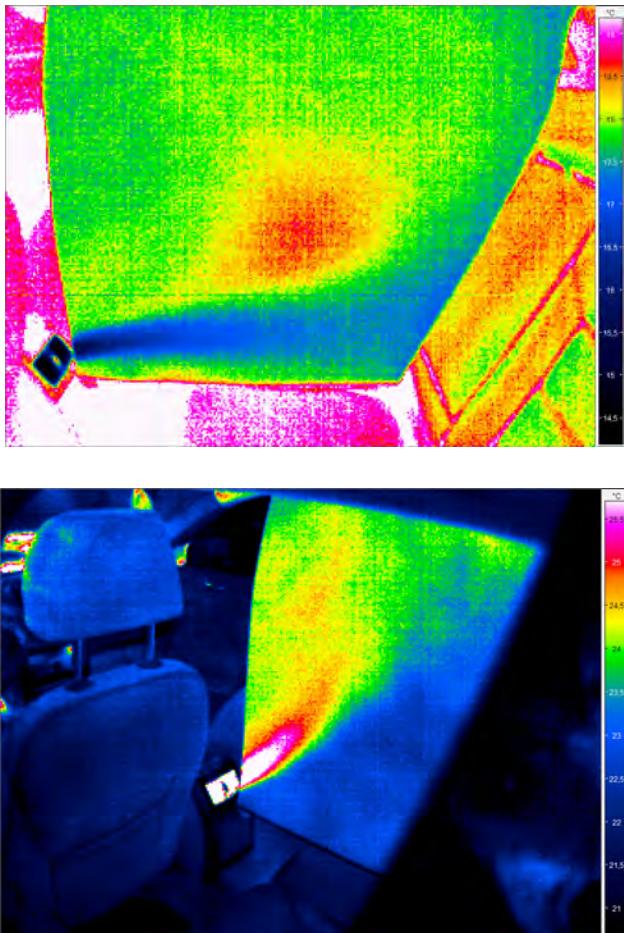


Fig. 3. Thermograms of measured temperature field in 2D airstream (left-cold and right-hot) in a car cabin using the method of measuring temperature field on the sheet of planar office paper through the polyethylene window

## 6. Conclusion

The experiment results show that the measurement of temperature fields in the air on the auxiliary material through a partially transmissive viewing window is possible and results are very illustrative. The temperature fields of isolated air outlet for rear seats of Škoda Octavia II Combi was visualized on the planar office paper through the polyethylene foil using the infrared camera. This measuring method of visualization was used because air streamlines from mouth outlet was practically situated parallelly to the planar sheet of an auxiliary material (the temperature fields measuring method in 2D airstream).

For measuring temperature fields in front seats in the car cabin or during the measuring with more outlets together is necessary to use the measuring net with measuring targets. Moreover, measuring targets are necessary use in measuring temperature fields in 3D airstreams.

## References

- [1] Williams T.L., *Thermal Imaging Cameras: Characteristics and Performance*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Bromley (England) 2009.
- [2] Minkina W., Dudzik S., *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. John Wiley and Sons, Częstochowa University of Technology, Poland 2009.
- [3] Vollmer M., Möllmann K.P., *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Germany 2010.
- [4] Holst G.C., *Common sense approach to thermal imaging*. JCD Publishing, Winter Park, Florida (USA) 2009.
- [5] Pavelek M., Janotkova E., *Analysis of parameters having a bearing on surface temperature changes of building structures* (Original in Czech). Strojárstvo/Strojírenství, 2009, No. mimoriadne, pp. 197–200.
- [6] Pešek M., Pavelek M., *Determination of needed parameters for measuring temperature fields in the air by thermography*. Experimental Fluid Mechanics, Vol. 2, pp. 888–892, Technical University of Liberec, Jičín (Czech Republic) 2011.

## Acknowledgement

The support of this research from Czech Science Foundation project no. GA 101/09/H050 “Research into energy-saving devices to achieve comfort of the internal environment” and the standard project FSI-S-11-6 “Human Centered Design” is gratefully acknowledged”.

*This paper has already been presented at the Conference: ICCCS 2012 – International Symposium on Contamination Control 2012, ETH Zurich.*

EWA ZENDER-ŚWIERCZ<sup>1</sup>  
JERZY Z. PIOTROWSKI<sup>2</sup>

Kielce University of Technology  
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
25-314 Kielce, Poland

<sup>1</sup> e-mail: ezender@tu.kielce.pl

<sup>2</sup> e-mail: piotrowski@tu.kielce.pl

# **THERMOMODERNIZATION A BUILDING AND ITS IMPACT ON THE INDOOR MICROCLIMATE**

## **Abstract**

*Analysis of indoor climate conditions showed problems with the proper operation of ventilation systems in the thermomodernization building. Thermomodernization was to seal the roof. The result of the study is a proposal for a global view of the building instead of narrowly targeted on thermal insulation and sealing the building envelope. Such an approach will prevent the feeling of discomfort inside the flats and provide an appropriate level of microclimate parameters.*

**Keywords:** ventilating, thermomodernization, moisture condensation

## **1. Introduction**

Modernization of buildings concentrates on the protection of heat within them. It is often related to disturbances in functioning of the building. Here the problems arise with, among others, the correct operation of ventilation, occurring fungus, etc., which results in "sick building syndrome". Accordingly, before making any changes in the object, the manager of the building should look at the building as a whole i.e. the structure together with existing installations and the users. A helpful tool in the preliminary study of the building before modernization is the use of the thermovision technique to assess, among others, the condition of thermal insulation [2].

Thermomodernization by an additional warming of the building and the replacement of windows and doors has a direct impact on the airflow in the building. Reduction of heat loss associated with reduced, or even block, the inflow of air into the interior. A further consequence of such action is to increase the concentration of carbon dioxide and humidity of indoor air. This, in turn, leads to appearing of the fungus on the internal walls.

## **2. Study subject**

The subject of analysis was a flat located on the last floor of a multifamily building. It was equipped with natural ventilation. The research was conducted in two phases before and after thermomodernization. Each time it was in the winter at very low external temperatures when the work of natural ventilation should be correct due to the large differences in the parameter inside and outside.

The study included the measurement of the concentration of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), internal and external air temperature, walls temperature and humidity of indoor air.

## **3. Analysis of indoor air parameters**

### **3.1. The concentration of carbon dioxide**

For the measurement of the concentration of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) a double-beam sensor using strictly defined relationship band attenuation of infrared radiation is used. Measuring range: 0–5000 ppm.

Figure 1 shows the course of the excess carbon dioxide in time for one day in different rooms. The highest values were observed in the nursery, the lowest

were in the hall. High values of CO<sub>2</sub> concentration in the kitchen occurred during daylight hours when the gas-stove was used. In each of the rooms the limit of carbon dioxide concentration (700 ppm above the value in ambient air [1]) was exceeded.

The measurement was done with the windows closed. The micro-opening did not result in improvement of the microclimate. Not till then when the windows were opened the analyzed parameter were lowered. The observed results are the same as those obtained in other studies presented in [3].

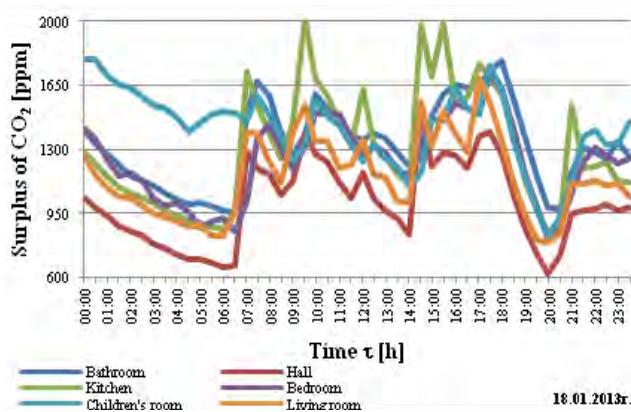


Fig. 1. Changes of the concentration of carbon dioxide in time for different rooms

It should be noted that the last change amendment introduced in the building was sealing the roof without thorough analysis of the work of ventilation. The changes made in the previous years of operation of the building for example that the sealed window frames were mounted previously were not also taken into account. It is supposed that the installation of new windows has caused reduction of the inflow of air into the facility, but had not caused visible changes in the functioning of the flats. This can be seen when analyzing the Figure 2, which contains course of changes in CO<sub>2</sub> concentration before and after the thermomodernization. Despite the tight joinery surplus analyzed parameter above the value in external air was lower than the limit value [1].

After sealing the roof we see a large increase in the analyzed parameter that throughout the period of measurement exceeds the limit value (for comparison, the results published in [4]).

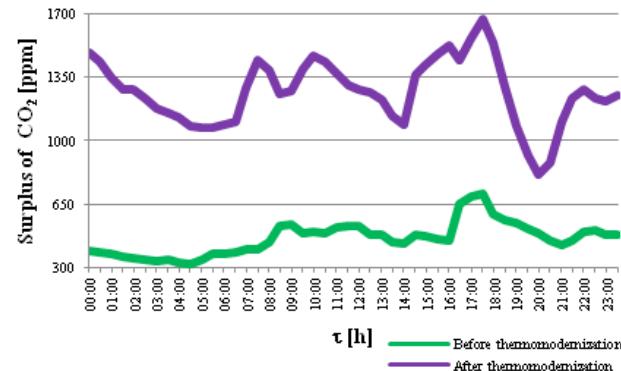


Fig. 2. Changes of the concentration of carbon dioxide in time before and after thermomodernization

### 3.2. Internal air temperature

Because the fungus on the exterior walls in bedroom, children's room and the living room was observed the tenants began opening the windows what resulted in drop in internal temperature (Fig. 3). The temperature after thermomodernization was lower about 1K than the value of parameter before sealing the roof.

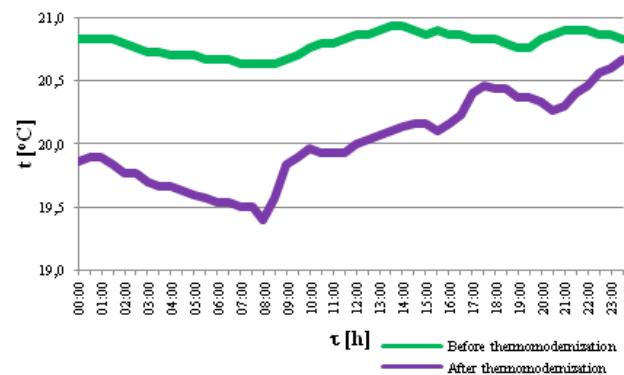


Fig. 3. Changes of the interior temperature in time before and after thermomodernization

### 3.3. Humidity of indoor air

Also the internal humidity was analyzed. Figure 4 exposes an increase of the analyzed parameter after sealing the roof. Taking into account the temperature and humidity of the internal air (with closed windows or micro-opened windows) using the Mollier's Graph, the dew point was determined. The comparison of this value with the temperature of the external wall showed crossing the dew point which means that moisture will be condensing on the wall surface. Hence fungus occurring on the wall.

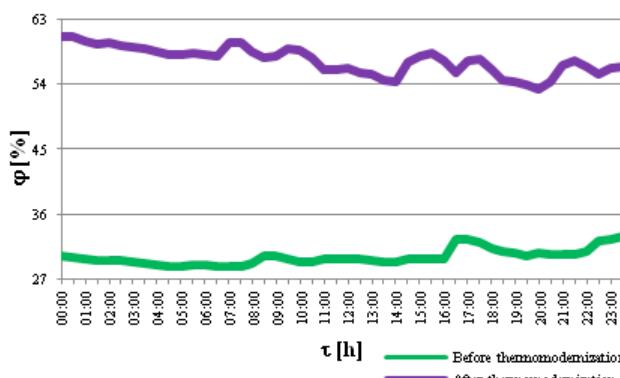


Fig. 4. Changes of the interior humidity in time before and after thermomodernization

Comparison of changes in humidity in time for various rooms showed the highest values of the parameter in the rooms where the only source of moisture were people. Air humidity in the kitchen and bathroom was lower than in the rooms. Therefore, the increase of the analyzed parameter was not due to the use of facilities.

#### 4. Summary

The problem of thermomodernization analyzed in the article is associated with focusing of building managers on reducing heat losses. The mistake is grasping the object not as a whole, consisting not only of the structure of the building, but like the object with the equipment that is mounted, installations, usage, and changes made in previous years.

Sealing the building results in a reduction of incoming air. Therefore, not considering reduced multiplicity of exchanges before implementing any changes into building will result in deterioration of the microclimate inside the building.

In the present case aspirations of users to improve the quality of indoor air by opening windows in the winter led to a cooling of the premises. This situation led to an increase in the cost of heating.

To avoid errors during repair work we should increase awareness of property managers on the operation of buildings. We should also oblige them to a holistic view of the object.

#### References

- [1] ASHRE. 2004. ANSI/ASHRAE Standard 62.1 - 2004, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc.
- [2] Orman Ł.J., Badania termowizyjne w ocenie termoizolacyjności budynków, Instal 4A/2009, s. 19–23, 2009.
- [3] Telejko M., Zender-Świercz E., Piotrowski J.Z., Jakość powietrza w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych. „Czasopismo Politechniki Lubelskiej” 2013, s. 67–74.
- [4] Zender-Świercz E., Piotrowski J.Z., Starzomska M., Wpływ prac remontowych pokrycia dachowego na mikroklimat pomieszczeń. Fizyka Budowli w teorii i praktyce 2013r.

Ewa Zender-Świercz  
Jerzy Z. Piotrowski

# Termomodernizacja budynku i jej wpływ na mikroklimat w pomieszczeniach

## 1. Wstęp

Modernizacja budynków skupia się na ochronie cieplnej. Często wiąże się to z zaburzeniami funkcjonowania budynku. Pojawiają się problemy m.in. z poprawnym działaniem wentylacji, występującym grzybem itp., co skutkuje „syndromem chorego budynku”. Pomożnym narzędziem, m.in. w ocenie termoizolacyjności przegród przed ewentualnymi działańami modernizacyjnymi, jest zastosowanie techniki termowizyjnej.

Termomodernizacja polegająca na dodatkowym ocieplaniu budynku tudzież wymianie stolarki okiennej i drzwiowej ma bezpośredni wpływ na przepływ powietrza w obiekcie. Ograniczenie strat ciepła wiąże się ze zmniejszeniem, lub nawet zablokowaniem, napływu powietrza do wnętrza.

## 2. Przedmiot opracowania

Przedmiotem zainteresowania było mieszkanie zlokalizowane na ostatniej kondygnacji budynku wielo-

rodzinnego, gdzie wentylacja realizowana była przez instalację grawitacyjną.

Badania prowadzone były w dwóch etapach przed dokonaniem termomodernizacji obiektu oraz po. Każdorazowo było to w okresie zimowym.

Badania obejmowały pomiar stężenia dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, temperatury powierzchni przegród budowlanych oraz wilgotności powietrza wewnętrznego.

### 3. Analiza parametrów powietrza wewnętrznego

#### 3.1. Stężenie dwutlenku węgla

Do pomiaru stężenia dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) zastosowano czujnik dwuwiązkowy wykorzystujący zależność tłumienia ściśle określonego pasma promieniowania podczerwonego. Zakres pomiaru: 0–5000 ppm.

Najwyższe zaobserwowane wartości wystąpiły w pokoju dziecięcym, najniższe w przedpokoju. Wysokie wartości stężenia  $\text{CO}_2$  w pomieszczeniu kuchni wystąpiły w godzinach dziennych kiedy użytkowana była kuchenka gazowa. W każdym z pomieszczeń dopuszczalna wartość stężenia dwutlenku węgla (700 ppm ponad stężenie w powietrzu zewnętrznym) była przekroczena. Pomiar wykonano przy zamkniętych oknach. Funkcja mikrouchylu nie spowodowała poprawy mikroklimatu, dopiero uchylenie okien skutkowało obniżeniem analizowanego parametru.

Należy zauważyć, iż ostatnią wprowadzoną w budynku zmianą było uszczelnienie dachu niepoprzedzone wnikiwą analizą pracy instalacji wentylacji. Nie uwzględniono również zmian wprowadzonych w poprzednich latach eksploatacji całego bloku, tzn. zamontowaniu wcześniej szczelnej stolarki okiennej. Należy przypuszczać, iż zamontowanie nowych okien ograniczyło napływ powietrza do obiektu, jednak nie spowodowało widocznych zmian w funkcjonowaniu mieszkań.

#### 3.2. Temperatura powietrza wewnętrznego

Ponieważ w pomieszczeniach sypialni, pokoju dzieci i salonie lokatorzy zaobserwowali grzyb na ścianachewnętrznych zaczęli otwierać okna co skutkowało wychłodzeniem mieszkań. Temperatura po termomodernizacji obniżyła się o ok. 1 K w stosunku do wartości parametru przed uszczelnieniem dachu.

#### 3.3. Wilgotność powietrza wewnętrznego

Analizie poddano również wilgotność powietrza wewnętrznego. Uwzględniając temperaturę powietrza wewnętrznego (przy zamkniętych lub rozszczelnio-

nnych oknach) z wykorzystaniem wykresu Mollier, określono temperaturę punktu rosy. Jej porównanie z temperaturą przegrody zewnętrznej wykazało przekroczenie tej wartości co oznacza wykraplanie się wilgoci na powierzchni ściany. Stąd występujący na przedgrodzie grzyb.

Porównanie zmian wilgotności w czasie dla różnych pomieszczeń wykazało najwyższe wartości parametru w pomieszczeniach, gdzie jedynym źródłem wilgoci są ludzie. W kuchni oraz łazience wilgotność powietrza była niższa, aniżeli w pokojach. Zatem wzrost analizowanego parametru nie wynikał użytkowania pomieszczeń.

#### 4. Obliczenia i ich analiza

Poruszony w artykule problem termomodernizacji wiąże się z ukierunkowaniem zarządców budynków na ograniczenie strat ciepła. Błądem jest brak spojrzenia na obiekt jako całość składającą się nie tylko z konstrukcji budynku, ale również jego wyposażenia, tzn. zamontowanych instalacji, sposobu użytkowania oraz zmian wprowadzanych w latach wcześniejszych.

Uszczelnienie obudowy budynku skutkuje ograniczeniem ilości napływającego powietrza, dlatego brak uwzględnienia zmniejszenia krotności wymian przy wprowadzaniu jakichkolwiek zmian skutkuje pogorszeniem warunków mikroklimatycznych wewnętrz obiektu.

W analizowanym przypadku dążenia użytkowników mieszkań do poprawy jakości powietrza poprzez otwieranie okien w okresie zimowym prowadziły do wychłodzenia pomieszczeń, co prowadziło do wzrostu kosztów ogrzewania mieszkania.

Aby uniknąć błędów podczas prac remontowych, należy zwiększyć świadomość zarządców nieruchomości na temat funkcjonowania budynków oraz zobiligować ich do całościowego spojrzenia na obiekt.

PAWEŁ STAWCZYK

Kielce University of Technology

e-mail: pawle83@o2.pl

# THE INFLUENCE OF THE INTERPHASE REACTOR ON THE OPERATION OF 12-PULSE AC/DC THYRISTOR RECTIFIER

## Abstract

The parallel connection of 6-pulse component bridges in the 12-pulse rectifier requires associating inductors. The article presents an analysis of the influence on interphase reactor on the operation of 12-pulse AC/DC thyristor converter. A very important issue is to set the limit value of the load current, at a given firing angle of the thyristors which is working properly.

**Keywords:** AC/DC converter, power quality, interphase reactor, line currents, controlled rectifiers, multi-pulse AC/DC converters

## 1. Introduction

AC/DC converters are non-linear electrical loads which generate the higher harmonic currents into the power systems. Current deformations causes the increase of the active power losses and voltage waveform distortion in the AC networks. Multi-pulse systems ( $q$ -pulse) are used in order to reduce higher harmonic currents and voltages to the value specified by international standards.

It is possible to increase  $q$  number in the classical approach by series or parallel connection of  $p$  number of 3-phase bridges which are supplied by transformers with required phase shifting.

$$\phi = \frac{2\pi}{q p} \quad (1)$$

where:  $p$  – number of parallel connected 6-pulse bridges,  $q$  – pulse number.

Serial connection is not generally used because of increase in the total voltage drop on conducting semiconductor devices. Parallel connection requires interphase reactors enabling independent operation of the component bridges.

## 2. 12-pulse thyristor rectifier

An example of solution significantly reducing line current distortions of the network is the 12-pulse controlled rectifier which is an extension of 12-pulse diode rectifier with modulation in DC current circuit.

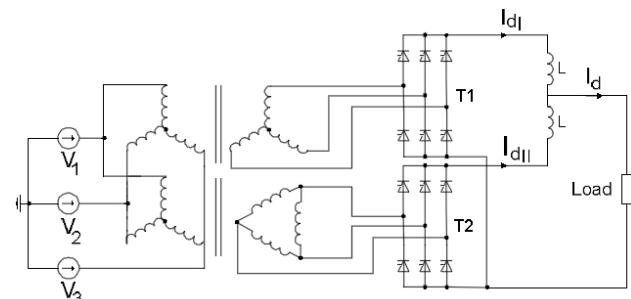


Fig. 1. 12-pulse thyristor rectifier

The rectifier consists of two parallel connected 6-pulse thyristor bridges supplied by Y/Y and Y/Δ transformers with the required  $30^\circ$  phase shifting. This shifting is necessary for the proper operation of the 12-pulse rectifier and allows to obtain stair shape of the line supply currents.

Simulation investigations have shown that properly selected interphase reactors cause the 12-pulse controlled rectifier works as multipulse rectifier. Taking into account:

$$I_{dI} + I_{dII} = I \quad (2)$$

$$I_{dI} = I_{dII}$$

The value of inductance  $L$  at the given firing angle of thyristors and the load current  $I_d$  should be such that amplitudes of the currents components bridges T1 and T2 are equal to half value of the load current. Load unbalance of the bridges, which can be seen

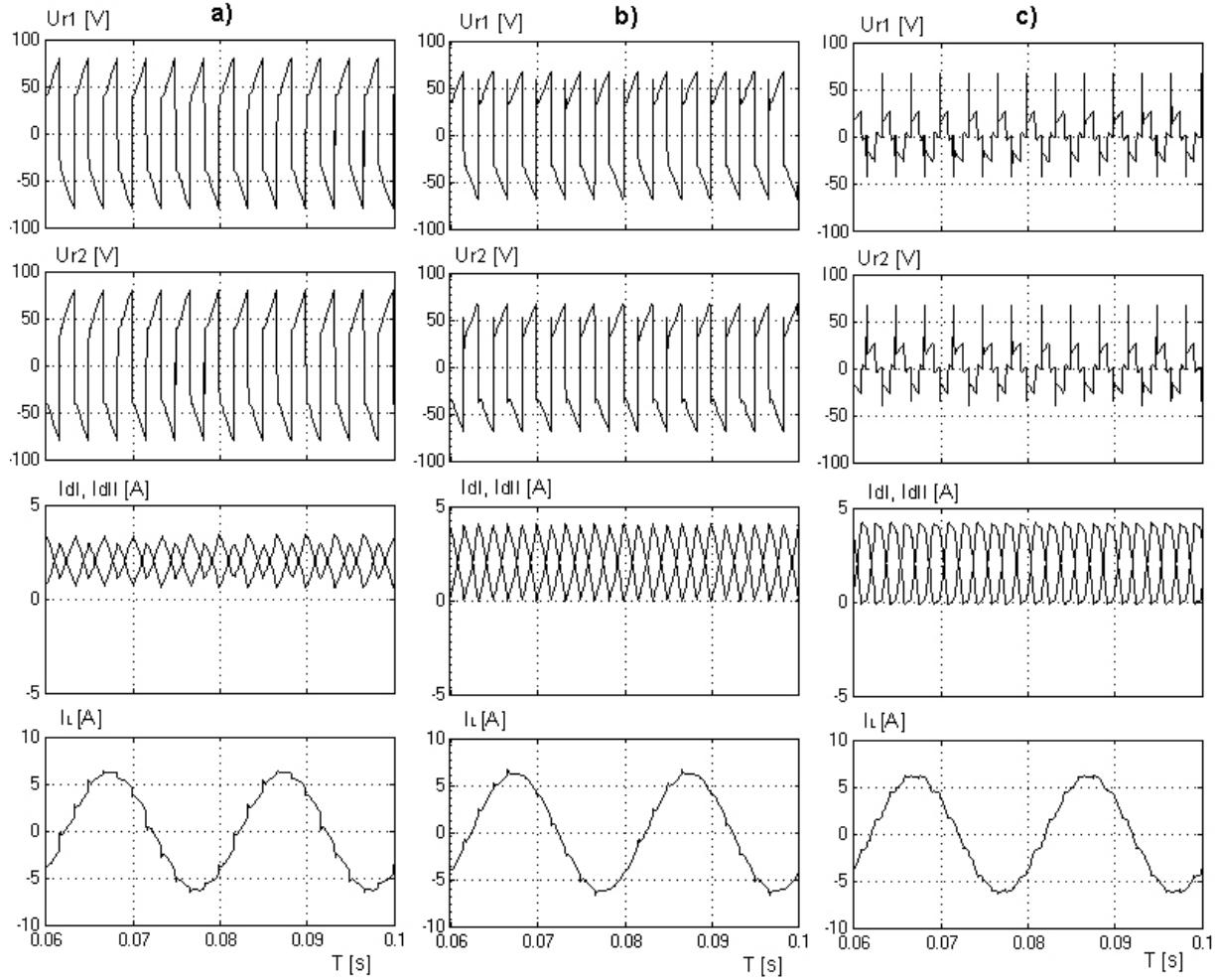


Fig. 2. Influence of interphase reactor on the load level of the component bridges T1 and T2 at the given firing angle  $\alpha = 45^\circ$ : a)  $L = 0.04 \text{ H}$ , b)  $L = 0.02 \text{ H}$ , c)  $L = 0.005 \text{ H}$

In Figure 2 results from the initial conditions of the system. It can be seen that the bridge which first begins to operate i.e. gets the first pulse of thyristors, takes part in the load current of the second bridge, which is attached at the end of 1.66 ms (delay angle  $30^\circ$ ). Assymetry in the load of both bridges is directly

dependent on the value of the load  $I_d$  and interphase reactor  $L$ .

The simulations showed that for a given firing angle of thyristors there is a correlation between inductance of interphase reactors  $L$  and value of the load  $I_d$  for the 12-pulse rectifier working as multipulse converter.

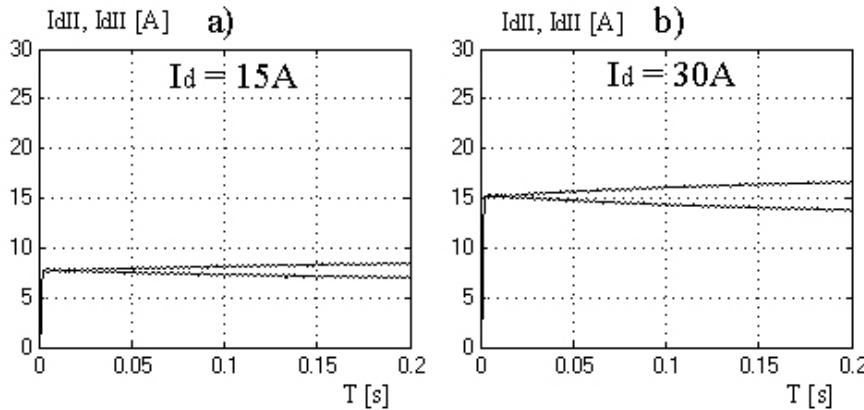


Fig. 3. The influence of the loading current on the component bridges current assymetry:  $L = 0.5 \text{ H}$ ,  $\alpha = 18^\circ$

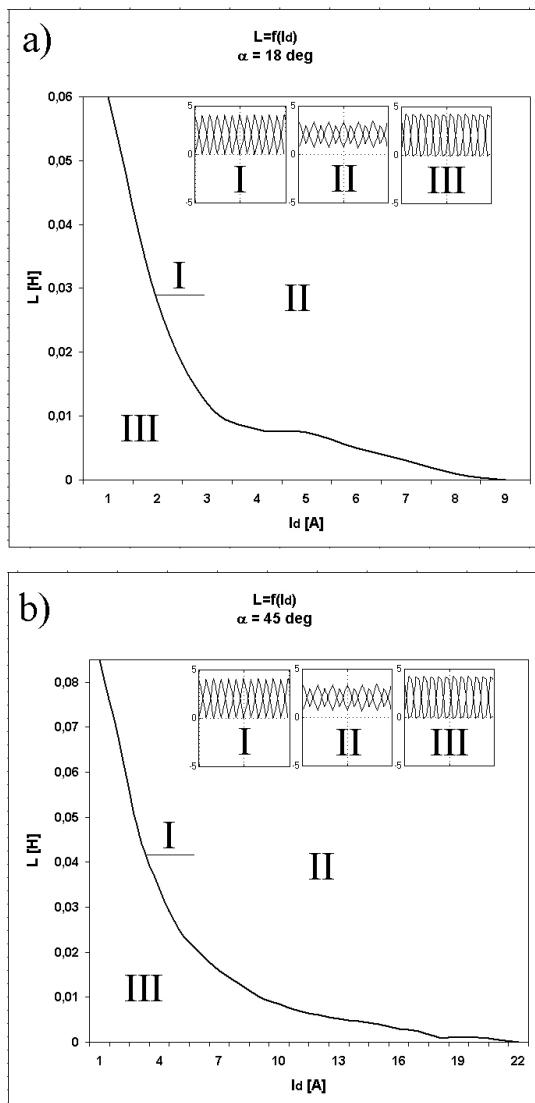


Fig. 4. The dependence of interphase reactor inductance on loading current  $L=f(I_d)$ : I – multipulse operation, II – underload operation, III – overload operation

### 3. Conclusions

The properly selected firing angle of thyristors in relation to a specified loading current result in time-varying loads of the components bridges T1 and T2 in such way that the sum of the loading currents  $I_{d1}$  and  $I_{d2}$  of these systems is equal to loading current  $I_d$  of the rectifier. Suitable values of inductance Figure 4 provides the multi-pulse operation of the rectifier. The shape of line currents of the converter in consequence is close to sinusoidal.

### References

- [1] Rolek J.: *Układy prostowników wielopulsowych z modulacją w obwodzie prądu stałego*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2008, 5(84), ISSN 0033-2097.
- [2] Anrvindan A.N., Pushpakarathick P.: *24-pulse rectifier realization 3-phase to four 3-phase transformation using conventional transformer*. NPEC 2010.
- [3] Miyairi S., Iida S., Nakata K., Masukawa S.: *New Method for Reducing Harmonics Involved in Input and output of Rectifier with Interphase Transformer*. IEEE Trans. On Industry Applications, IA-22 (5), pp. 790–797.
- [4] Kaplon A., Rolek J.: *Analysis of Multipulse Rectifiers with Modulation in DC Circuit in Vector Space Approach*. 2008 13<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008).
- [5] Paice D.A.: *Power Electronic Converter Harmonics Multipulse Methods for Clean Power*. IEEE PRESS New York 1996.
- [6] Younis M., Rahim N., Mekhlef S.: *Harmonic reduction in a three-phase rectifier with sinusoidal current*. Power System Technology, 2002. PowerCon 2002. International Conference, Vol. 4, pp. 2251–2255.

### Acknowledgement

The research has been partially funded by: NCN – research project N N510 356936.

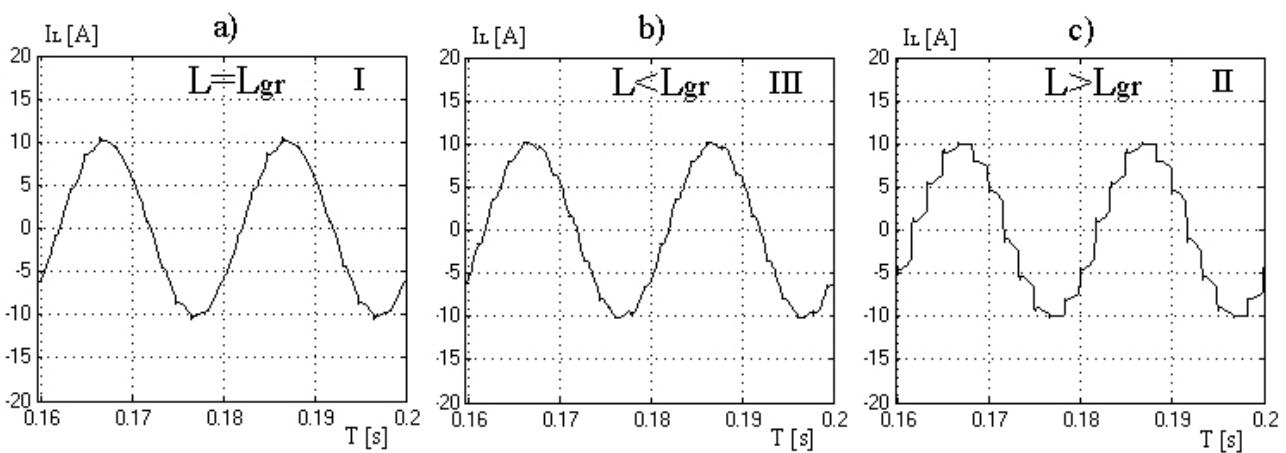


Fig. 5. The line current waveforms for loads as shown in Figure 4, respectively

Paweł Stawczyk

## Wpływ dławika kojarzącego na pracę tyristorowego prostownika 12-pulsowego

### 1. Wprowadzenie

Przekształtniki AC/DC są nieliniowymi obciążeniami elektrycznymi, które generują wyższe harmoniczne prądy do lini zasilającej. Odkształcenia prądu powodują zwiększenie strat mocy oraz deformację kształtu napięcia w sieci zasilającej. W celu zredukowania wyższych harmonicznych prądów oraz napięć do wartości przewidzianej przez międzynarodowe standardy stosuje się przekształtniki wielopulsowe ( $q$ -pulsowe).

W klasycznych rozwiązaniach zwiększenie liczby pulsów  $q$  uzyskuje się poprzez szeregowe lub równoległe połączenie  $p$  trójfazowych układów mostkowych zasilonych przez transformator o symetrycznym układzie napięć wtórnego przesuniętych względem siebie o kąt określony przez zależność (1).

Szeregowo połączenie jest rzadko stosowane ze względu na zwiększenie spadków napięć na przewodzących łącznikach. Połączenie równoległe wymaga zaś stosowania dławika kojarzącego, który zapewnia niezależną pracę składowych układów mostkowych.

### 2. 12-pulsowy prostownik tyristorowy

Przykładem rozwiązania znacznie zmniejszającego odkształcenia prądu liniowego w sieci zasilającej jest prostownik 12-pulsowy sterowany, który jest rozwińciem koncepcji prostownika 12-pulsowego z modulacją w obwodzie prądu stałego.

Prostownik składa się z dwóch równolegle połączonych 6-pulsowych mostków tyristorowych zasilonych przez transformator, którego uzwojenia wtórne połączone są odpowiednio w Y/Y oraz Y/ $\Delta$ , co powoduje przesunięcie układu napięć fazowych o kąt elektryczny  $30^\circ$ . Kąt ten zapewnia poprawną pracę 12-pulsowego prostownika i pozwala uzyskać 12-schodkowy kształt liniowych prądów zasilających.

Badania symulacyjne wykazały, że dla poprawnie dobranej wartości indukcyjności dławika kojarzącego, 12-pulsowy prostownik tyristorowy pracuje jak prostownik multipulsowy.

Wartość indukcyjności  $L$  dla danego kąta wysterowania tyristorów oraz prądu obciążenia  $I_d$  powinna

być taka, by amplitudy prądów składowych mostków T1 oraz T2 były równe połowie wartości prądu obciążenia. Asymetria obciążenia każdego z mostków, co pokazuje rysunek 2, wynika z warunków początkowych układu. Można zauważyć, że mostek, który jako pierwszy włączy się do pracy, tzn. jako pierwszy zostanie załączony impulsem wyzwalającym tyristory, przejmuje część prądu obciążenia mostka drugiego, który jest dołączany po upływie  $1,66\text{ ms}$  (opóźnienie kątowe  $30^\circ$ ). Asymetria obciążenia obu mostków zależy bezpośrednio od wartości prądu obciążenia  $I_d$  oraz indukcyjności  $L$  dławika kojarzącego.

Przeprowadzone symulacje wykazały, że przy określonym prądzie obciążenia  $I_d$  istnieje optymalna wartość kąta wysterowania tyristorów, zależna od indukcyjności dławika kojarzącego  $L$ , dla której 12-pulsowy prostownik tyristorowy wykazuje cechy przekształtnika multipulsowego.

### 3. Wnioski

Poprawnie dobrany kąt wysterowania tyristorów w stosunku do zadanej wartości prądu obciążenia zapewnia zmienną w czasie asymetrię mostków składowych T1 oraz T2 w ten sposób, że suma prądów  $I_{d1}$  oraz  $I_{d2}$  tych układów jest równa całkowitemu prądowi obciążenia  $I_d$  prostownika. Odpowiednio dobrana wartość indukcyjności (rys. 4) umożliwia multipulsową pracę prostownika. Kształt prądów zasilających przekształtnika jest w konsekwencji bliski sinusoidalnemu.

Maria Nowak (Font size 10 pt Times New Roman)  
Kielce University of Technology  
e-mail: mmmm@tu.kielce.pl

## **HOW TO PREPARE THE MANUSCRIPT (Font size 14 pt Times New Roman)**

### **Abstract**

*The abstract should not exceed 10 lines. It should provide information about the objectives of the work, methods used and test results obtained in the course of the experiments/analyses.*  
*(Font size 10 pt Times New Roman Italic)*

**Keywords:** phrases, words (Font size 10 pt Times New Roman)

### **1. Introduction**

The introduction should present the background of the work (font size 11 pt Times New Roman).

### **2. Main text**

#### **2.1. General information**

The paper volume should not exceed 8 pages of A4 size with font size of 11 pt (Times New Roman). The number in square brackets [1] should be used for quotations. The paper should be sent by email to sae@tu.kielce.pl. The papers in the journal are reviewed.

#### **2.2. Figures**

Figures (in black and white or colour) should be of good quality and numbered with the sequence of their appearance in the text. They should be centered and have a caption of 10 pt size. High resolution files \*.JPG, \*.WMF, \*.CDR, \*.TIFF, \*.EPS, \*.BMP files should be used and inserted into the text as well as sent as separate files. 10 pt spacing should be left between the figure and the text.

#### **2.3. Tables**

Tables should be centered. Titles should be placed above the tables and written with font size of 10 pt (Times New Roman). The same applies to the text in the table (see example below).

**Table 1.** Title of the table.

No	table	table	table
1	table	table	table
2	table	table	table
3	table	table	table

#### **2.4. Equations**

Equations and formulas should be centered and numbered in brackets. 11 pt spacing should be left between the equation and the text above and below it.

### **3. Conclusions**

#### **References (*arranged in the citing order*):**

- [1] Nowak M.: *Modelowanie konstrukcyjne (Structural modelling)*. Postępy Technologiczne 10 (2000), pp. 30-34.
- [2] Zarylski R.: *Pomiary dynamiczne (Dynamic measurements)*. WNT, Warszawa 1971.

(Font size 10 pt Times New Roman)

Maria Nowak

## **Tytuł w języku polskim**

### **1. Wprowadzenie**

### **2. Tekst artykułu**

Tekst w języku polskim ma odpowiadać swoim układem wersji angielskiej, może być skrócony. Nie powinien zawierać tabel, rysunków, wzorów, a jedynie odniesienie do tych, które znajdują się w wersji angielskiej. Objętość artykułu nie powinna przekraczać 8 stron czcionką 11 (Times New Roman). Bibliografię należy umieszczać w nawiasie kwadratowym [1] i numerować w kolejności alfabetycznej. Artykuły należy przesyłać na adres sae@tu.kielce.pl. Artykuły są recenzowane.

### **3. Wnioski**

## **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

