

STRUCTURE AND ENVIRONMENT

ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND ENERGY

No. 2/2013 vol. 5 PL ISSN 2081-1500 www.sae.tu.kielce.pl KIELCE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Contents

structure

AGNIESZKA RÓG

- THE INFLUENCE OF THE SYNTHETIC ZEOLITE ON THE PROPERTIES OF ASPHALT BINDER 35/50** 5

TADEUSZ TURKIEWICZ, JACEK GÓRA, WOJCIECH PIASTA

- THE EFFECT OF IGNEOUS ROCK AGGREGATES ON FLEXURAL AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE** 12

JOANNA GIL-MASTALERCZYK

- COMMONALITY OF CONCRETE IN CONTEMPORARY SACRED ARCHITECTURE** 19

environment

JOZEF JANDAČKA, ANDREJ KAPJOR, MILAN MALCHO, ŁUKASZ J. ORMAN

- SELECTED SCIENTIFIC AND ENGINEERING APPLICATIONS OF INFRARED TECHNOLOGY** 31

MARTIN VANTÚCH, ANDREJ KAPJOR, MILAN MALCHO, JOZEF HUŽVÁR, ŠTEFAN PAPUČÍK

- OPERATIONAL MEASUREMENT OF GROUND/WATER HEAT PUMP IN COLD WEATHER** 40

PAWEŁ STAWCZYK

- HARMONIC REDUCTION TECHNIQUES USING MULTI-PULSE RECTIFIERS** 43

- 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

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



Kielce University of Technology
2013



structure
structure

AGNIESZKA RÓG
Kielce University of Technology
e-mail: arog@tu.kielce.pl

THE INFLUENCE OF THE SYNTHETIC ZEOLITE ON THE PROPERTIES OF ASPHALT BINDER 35/50

Abstract

The primary objective of this study was to investigate the impact of the mineral additive to Warm Mix Asphalt – the synthetic zeolite, on the properties of the asphalt binder 35/50. A synthetic zeolite is an additive in the form of very fine powder that – when added to the hot bitumen – generates a foaming effect and allows to increase the workability of the asphalt mixture at lower mixing and laying temperatures. The laboratory tests, which were carried out on asphalt binder 35/50 with 3 contents of synthetic zeolite, proved that it does not significantly influence the thermal sensitivity of the asphalt and increases the viscosity of the bitumen as a result of the mineral filling effect of the zeolite which – after initial foaming – remains un-dissolved in the binder.

Keywords: warm mix asphalt, road pavements, synthetic zeolite, asphalt binder 35/50

1. Introduction

In modern civil engineering, environment friendly technologies are one of the main targets for engineers. A great progress is noticed in this area. European countries are using technologies that appear to allow a reduction in the temperatures at which asphalt mixes are produced and placed. These technologies have been labeled Warm Mix Asphalt (WMA). The immediate benefit of production of WMA is the reduction in energy consumption required by burning fuels to heat traditional Hot Mix Asphalt (HMA) to temperatures in excess of 160°C at the production plant. These high production temperatures are needed to allow the asphalt binder to become viscous enough to completely coat the aggregate in the HMA, have good workability during laying and compaction, and durability during traffic exposure. With the decreased production temperature comes the additional benefit of reduced emissions of fumes and odors from burning fuels, generated at the plant and the paving site, longer paving ‘seasons’, longer hauling distances, reduced ageing and oxidative hardening of binders thus reduce cracking in the pavements [3].

Technologies that have been developed to produce WMA can be classified by the methodology used to improve asphalt concrete workability and two main categories can be identified: foaming process and the addition of dopes [6]. The foaming process that results in a binder’s volume expansion can be obtained by

the direct injection of water to the bitumen or by the utilization of hydro-thermally crystallized minerals such as zeolites [7].

Zeolites can occur as natural mineral or can be synthesized. The synthetic ones are finely powdered hydrated sodium aluminum silicates that are principally composed of a siliceous structure with large and interconnected spaces. Thanks to these spaces, zeolite can accommodate molecules of water in its structure (approx. 20%) and remove it reversibly by the application of heat. From a technical point of view, at mixing temperature, synthetic zeolite gradually releases a small amount of water and, as a consequence of water vapor emission, generates a foaming effect in the bitumen. This process allows to increase the workability of the asphalt mixture at mixing and laying temperatures about 30°C lower than traditional ones [9].

2. Objective

The usage of zeolite as a warm mix agent is relatively new in the asphalt industry, but in some countries like USA or Germany advanced researches are being carried out. The scientists who are undertaking investigation, restrict themselves to assessing the effect of zeolite on mix asphalt. Not enough attention is paid on evaluation of the effect of zeolite on the performance of asphalt binder, while it has a great influence on behavior of the mixes during the production and compaction phase. That is why the primary objective of this study was to

investigate the impact of the interactions between the synthetic zeolite and the asphalt binder.

3. Materials experimental procedure

Asphalt binder 35/50 and synthetic zeolite (structure A) were selected for the study. The output content of the zeolite was evaluated by converting the recommended 0.3% content of all mixture [1–4, 6, 8, 9] and as a result the optimum content averaged 5.5% from the quantity of asphalt binder. To achieve authoritative results, the test were carried out with pure asphalt binder, with the output content (5.5%) and with one higher content (7.5%) and one lower than the optimum one (3.5%). The following laboratory tests were carried out:

- penetration at 25°C, according to PN-EN 1426:2009,
- softening point, according to PN-EN 1427:2009,
- Fraass breaking point, according to PN-EN 12593:2009,
- dynamic viscosity at temperatures: 60°C, 90°C, 135°C, 160°C, according to PN-EN 12596:2009.

The samples for these tests were prepared by mixing the proper amount of the zeolite with the asphalt heated up to 150°C with enough time to liquidize the bitumen. To create conditions similar to ones at the paving site, all the tests were carried out the same day the samples were prepared, but keeping the conditioning time demanded for the particular test.

4. Results and discussion

To determine the thermal sensitivity of the asphalt binder, softening point test and Fraass breaking point test were conducted with and without the addition of the zeolite. The results are shown in Figure 1.

The Fraass breaking point test results oscillate between -11 and -12°C. In accordance with PN-EN 12593:2009, the acceptable difference between the results is 3°C for the particular type of asphalt binder. Taking that into consideration, the received results are compatible with the norm condition and the addition of zeolite can be acknowledged as insubstantial on the breaking point.

A similar situation was performed for the softening point test. The received temperatures, for each content of the zeolite, were higher in comparison to the pure asphalt, but still the differences were not significant. In accordance with PN-EN 1427:2009, that estimates 2°C as the acceptable difference between the results for the particular type of asphalt binder, it can be assumed that the softening point was slightly increased but not significantly changed by the addition of the zeolite.

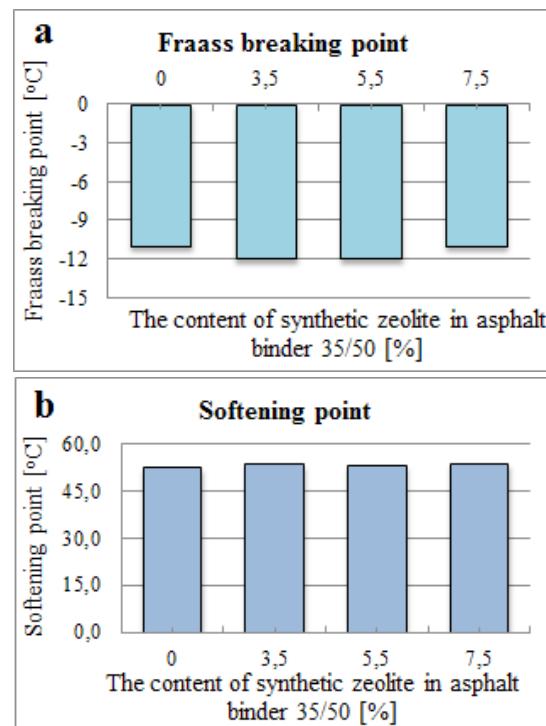
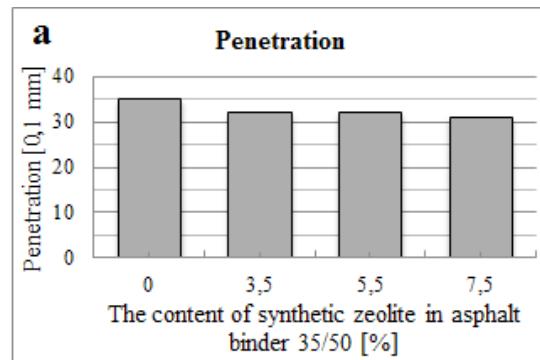


Fig. 1. Tests results depending on the contents of synthetic zeolite in asphalt 35/50: a) Fraass breaking point
b) Softening point

Another test that was carried out was the penetration test to evaluate the consistency of the binder. Once the softening point and penetration were determined, these results were used to evaluate another thermal sensitivity parameter – the penetration index. The results are shown in Figure 2.

Figure 2 shows that the addition of the zeolite dropped the penetration and the higher content of the zeolite in the asphalt the lower value of penetration.

The penetration index, evaluated on the penetration and softening point test data, established in a level of -1,3 for all binders with different contents of the zeolite. At the same time these results correlate well with the previous tests, validating the earlier claim that the addition of the zeolite does not affect the thermal sensitivity of the asphalt binder.



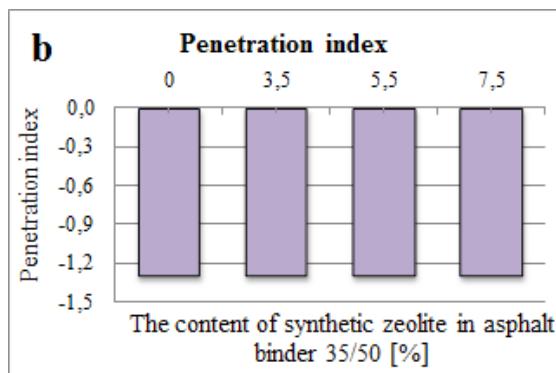


Fig. 2. Tests results depending on the contents of synthetic zeolite in asphalt 35/50: a) Penetration b) Penetration index

To determine the rheological feature of the asphalt binder, dynamic viscosity test was evaluated at 4 temperatures equivalent to production and traffic exposure conditions: 60°C – exploitation, 90°C – compaction, 135°C – placement, 160°C - production. One sample, with the particular addition of the zeolite, was used to evaluate the viscosity at every temperature. It was first heated up to the lowest temperature (60°C) and after the end of the test, the heating and testing processes were continued. Figure 3 presents dynamic viscosity results at 60°C and 90°C, while Figure 4 at 135°C and 160°C, respectively.

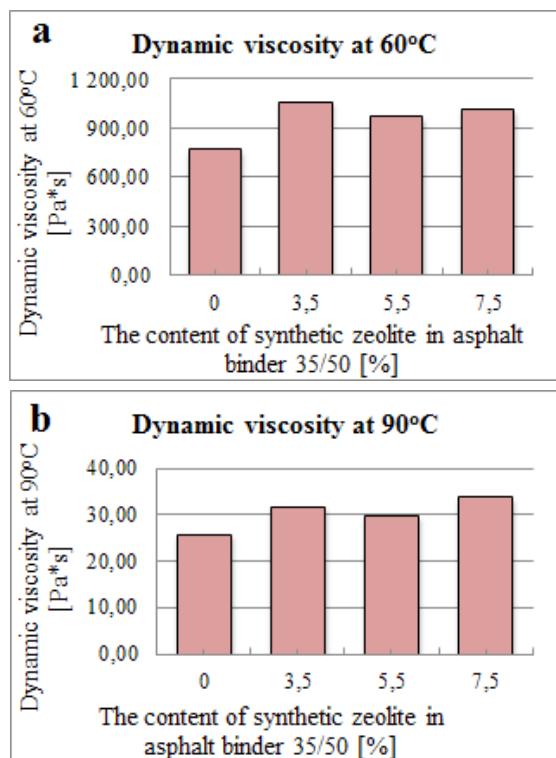


Fig. 3. Dynamic viscosity test results depending on the contents of synthetic zeolite in asphalt 35/50 at:
a) 60°C, b) 90°C

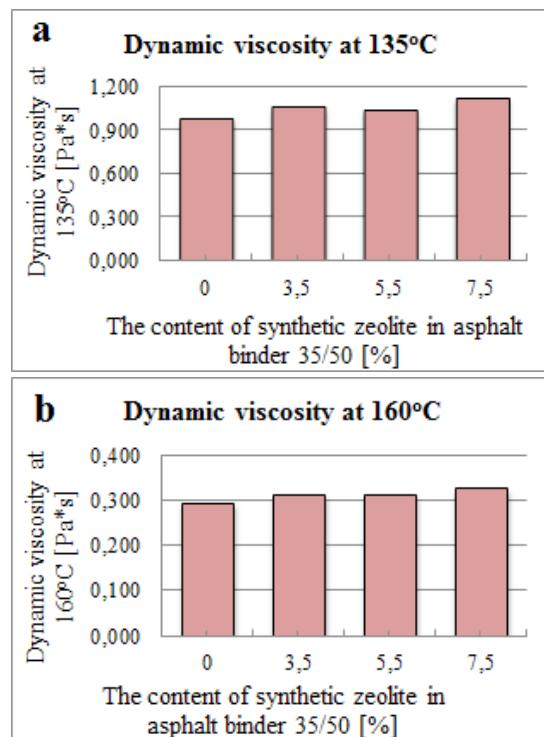


Fig. 4. Dynamic viscosity test results depending on the contents of synthetic zeolite in asphalt 35/50 at:
a) 135°C, b) 160°C

In general, it is observed that every content of the zeolite results in a rise of the dynamic viscosity as compared to the pure asphalt, irrespective of the test temperature. Another tendency that can be observed is that the lowest viscosity values were obtained for the content of 5.5% of the zeolite at every test temperature. Therefore, 5.5% content can be evaluated as the optimum one, which confirms the accurate recommended addition of 0.3% of the zeolite from the quantity of all asphalt mix [1-4, 6, 8, 9] which equals 5.5% from the quantity of the asphalt binder. The reason for the increase in viscosity can be attributed to the addition of solid material in a form of a fine powder to the binder, which – after initial foaming – remains un-dissolved in the binder and acts as a filler.

The changes in the viscosity values of the asphalt binder with the synthetic zeolite are still being investigated by many scientists. There are findings in the literature that confirm the above claim that the zeolite causes the increase of the asphalt viscosity [1-3], but there are also test results that proves the opposite statement [7, 8]. It is certain though, that such unequivocal tendency is a result of the materials used in the experiments: the type of the asphalt binder, its output properties, the chemical structure and source of the particular synthetic zeolite.

The matter that should be evaluated in further investigations is the impact of the synthetic zeolite on the properties of asphalt mixes, especially on the content of air voids and moisture sensitivity at lower production and compaction temperatures. Such evaluation would stand for the claim that chemical reactions other than viscosity of the binder are behind the positive impact of the zeolite as warm mix additive.

5. Conclusions

Based on the results from the laboratory testing using the synthetic zeolite as warm mix additive to the asphalt binder, the following conclusions were made:

- the addition of synthetic zeolite does not influence the thermal sensitivity of the asphalt binder, which was confirmed by the following tests: softening point, Fraass breaking point and penetration index,
- the addition of synthetic zeolite slightly lowers the penetration of the asphalt binder,
- the addition of synthetic zeolite results in a rise of the dynamic viscosity due to the filling effect of the additive that after the initial release of water and foaming effect in the bitumen, remains undissolved in the binder.

References

- [1] Akisetty C., Amirkhanian S., Lee S.J.: *High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives*, Construction and Building Materials, Elsevier Ltd., No. 23, 2007, pp. 565–573.
- [2] Amirkhanian S., Biro S., Gandhi T.: *Determination of Zero Shear Viscosity of Warm Asphalt Binders*, Construction and Building Materials, Elsevier Ltd., No. 23 (5), 2009, pp. 2080–2086.
- [3] Amirkhanian S., Gandhi T.: *Laboratory investigation of warm asphalt binder properties – a preliminary analysis*, Proceedings of 5th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV5), Park City, USA 2007.
- [4] Barthel W., Marchand J.-P., Von Deviere M.: *Warm asphalt mixes by adding aspha-min® a synthetic zeolite*, Proceedings of the Third Eurasphalt and Eurobitume Conference, Book 1, Foundation Eurasphalt, Breukelen, The Netherlands, 2004.
- [5] Castelo Branco V.T.F.: *Modification of asphalt mixtures (hot and warm) by the addition of zeolite*, Vanconcelos et al 2008.
- [6] Gallelli V., Iuele T., Vaiana R.: *Warm Mix Asphalt with Synthetic Zeolite: a Laboratory Study on Mixes Workability*, Internation Journal of Pavement Research and Technology, Chinese Society of Paving Engineering, Vol. 6 No. 5 Sep. 2013, pp. 562–569.
- [7] Gorkem C., Sengoz B., Topal A.: *Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives*, Construction and Building Materials, Elsevier Ltd., No. 43, Turkey 2013, pp. 242–252.
- [8] Guegan M., Selvamohan S., Wasiuddin N., Zaman M.: *Comparative Laboratory Study of Sasobit and Aspha-Min Additives in Warm-Mix Asphalt*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, pp. 82–88.
- [9] Hurley G.C., Prowell B.D.: *Evaluation of Aspha-Min zeolite for use in arm mix asphalt*, National Center for Asphalt Technology, NCAT Auburn University 2005.

Agnieszka Róg

Wpływ syntetycznego zeolitu na właściwości asfaltu 35/50

1. Wstęp

Ochrona środowiska naturalnego jest jednym z głównych zadań w nowoczesnym budownictwie drogowym. W tej dziedzinie notuje się ostatnio znaczący postęp. W krajach europejskich pojawiają się nowe technologie zmniejszające emisję gazów podczas produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych i budowy nawierzchni. Technologie te nazywane są WMA – *Warm Mix Asphalt* (mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło). Bezpośrednią korzyścią wynikającą z budowy WMA jest redukcja energii potrzebnej do wyprodukowania tradycyjnej mieszanki mineralno-asfaltowej na gorąco HMA – *Hot Mix Asphalt*. Wyokie temperatury konieczne do produkcji mieszanek na gorąco wynikają z potrzeby obniżenia lepkości lepiszcza asfaltowego, aby mogło otoczyć kruszywo, zapewniało dobrą urabialność oraz zagęszczalność podczas wbudowywania mieszanki, a także zapewniało trwałość w całym okresie eksploatacji nawierzchni. Z obniżeniem temperatury mieszanek związane są inne korzyści, jak: redukcja emisji gazów, wydłużony sezon budowlany, dłuższe dystanse transportu mieszanki, redukcja starzenia i utleniania się asfaltu, a tym samym zmniejszenie spękań nawierzchni [3].

Rozwinięte technologie WMA można podzielić ze względu na sposób poprawy urabialności betonu asfaltowego na dwie kategorie: wykorzystujące proces spieniania i stosowania dodatków [6]. Proces spieniania, który powoduje wzrost objętości asfaltu może być osiągnięty dwoma sposobami: dodaniem pod ciśnieniem wody do gorącego lepiszcza lub zastosowaniem hydrotermalnie krystalizowanych minerałów, takich jak zeolity [7].

Zeolity mogą być naturalne lub syntetyczne. Syntetyczne zeolity to krzemiany wapniowo-glinowe, występujące w postaci bardzo drobnego proszku. Odznaczają się dużą zawartością połączonych ze sobą mikrokanalików, które zawierają wodę (nawet do 20% m/m) i mają zdolność oddawania jej pod wpływem ciepła. Z technicznego punktu widzenia

pod wpływem temperatury mieszania woda z porów zeolitu stopniowo uwalnia się i paruje, powodując spienianie dodanego asfaltu. Proces ten pozwala na obniżenie temperatur, a piana asfaltowa otacza ziarna kruszywa mineralnego, co pozwala na poprawę urabialności mieszanki w temperaturach niższych nawet o ok. 30°C niż tradycyjne [9].

2. Cel opracowania

Stosowanie syntetycznego zeolitu jako środka obniżającego temperaturę produkcji MMA nie jest zbyt powszechnie, ale w krajach takich jak USA czy Niemcy prowadzi się zaawansowane badania. Naukowcy podejmujący się badania wpływu tego dodatku ograniczają się jednak do badania jego wpływu na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej. Mało uwagi poświęca się badaniu wpływu syntetycznego zeolitu na właściwości samego lepiszcza asfaltowego, podczas gdy ma on ogromne znaczenie na właściwości mieszanki w czasie jej produkcji i zagęszczania. Z tego względu przedmiotem niniejszego opracowania było zbadanie wpływu dodatku syntetycznego zeolitu na właściwości asfaltu.

3. Materiały i procedury badawcze

Do badań wykorzystano asfalt zwykły 35/50 i syntetyczny zeolit o strukturze A. Wyjściową ilość zeolitu względem asfaltu określono przeliczając zalecaną zawartości tego dodatku w stosunku dla masy całej mieszanki mineralno-asfaltowej, która wynosi 0,3% [1–4, 6, 8, 9], w wyniku czego uzyskano wartość wyjściową równą 5,5% zeolitu w stosunku do masy asfaltu. Dla uzyskania miarodajnych wyników zbadano asfalt bez dodatku zeolitu, z wyjściową ilością (5,5%) oraz z zawartościami mniejszą (3,5%) i większą (7,5%) od wyjściowej. Wykonano następujące badania:

- penetracji w 25°C zgodnie z normą PN-EN 1426:2009,
- temperatury mięknienia zgodnie z normą PN-EN 1427:2009,

- temperatury łamliwości Fraassa zgodnie z normą PN-EN 12593:2009,
- lepkości dynamicznej w temperaturach: 60°C, 90°C, 135°C, 160°C zgodnie z normą PN-EN 12596:2009.

4. Wyniki i ich analiza

W celu określenia wrażliwości termicznej asfaltu bez i z różnymi zawartościami zeolitu, przeprowadzono badanie temperatury łamliwości Fraassa oraz badanie temperatury mięknięcia metodą Pierścienia i kuli, których wyniki przedstawiono na rysunku 1.

Wyniki badania łamliwości Fraassa oscylują między -11 a -12°C. Zgodnie z normą PN-EN 12593:2009, różnica między wynikami uzyskanych temperatur nie powinna być większa niż 3°C dla danego badanego rodzaju asfaltu. Biorąc to pod uwagę uzyskane wyniki spełniają warunek różnicy pomiaru, a ich rozbieżność jest tak mała, iż można uznać, że dodatek zeolitu do asfaltu, niezależnie od jego zawartości procentowej, nie ma wpływu na temperaturę łamliwości.

Podobną tendencję zaobserwowano dla badania temperatur mięknięcia. Można zauważyć, że dla wszystkich asfaltów z dodatkiem zeolitu uzyskano wyższą temperaturę w stosunku do czystego asfaltu bez dodatku, ale różnice nie były znaczące. W tym przypadku również mieszczą się w zakresie rozbieżności wyników pomiarów podanych w stanowiącej podstawę badania normie PN-EN 1427:2009, zgodnie z którą dopuszczalne różnice w wynikach nie powinny być większe niż 2°C. Można zatem uznać, że temperatura mięknięcia asfaltu była delikatnie zwiększena, ale nie znacząco zmieniona przez dodatek zeolitu.

W celu określenia konsystencji asfaltu z różnymi zawartościami zeolitu przeprowadzono badanie penetracji. Uzyskane wyniki tego badania oraz temperatury mięknięcia pozwoliły na obliczenie dodatkowego parametru charakteryzującego wrażliwość termiczną lepiszcza – indeksu penetracji. Wyniki badania penetracji oraz obliczonego indeksu penetracji przedstawiono na rysunku 2.

Z analizy wykresów wynika, że dodatek zeolitu do asfaltu spowodował obniżenie jego penetracji. Im większa była zawartość zeolitu w asfalcie, tym niższa penetracja.

Indeks penetracji, obliczony na podstawie wyników badań penetracji i temperatury mięknięcia, ustabilizował się na poziomie -1,3 dla wszystkich kombinacji asfaltu z zeolitem. Wyniki te dobrze korelują z poprzednimi wynikami badań, potwierdzając wcze-

śniejsze wnioski, że dodatek zeolitu nie wpływa na wrażliwość termiczną lepiszcza.

W celu zbadania właściwości reologicznych asfaltu, przeprowadzono badania lepkości dynamicznej w 4 temperaturach odpowiadających temperaturom, jakim poddany jest asfalt: 60°C – w czasie eksploatacji nawierzchni, 90°C – w czasie zagęszczania mieszanek, 135°C – w czasie wbudowywania oraz 160°C – w czasie produkcji. Jedna próbka asfaltu z daną zawartością zeolitu była wykorzystana do zbadania lepkości w każdej temperaturze. Najpierw była ona podgrzewana do najniższej temperatury badania i po jego zakończeniu ponownie doprowadzana do kolejnych wyższych temperatur badania aż do ich zakończenia. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badania lepkości w 60 i 90°C, a na rysunku 4 odpowiednio dla 135 i 160°C.

Generalnie zaobserwowano, że każda zawartość zeolitu w asfalcie skutkuje wzrostem jego lepkości niezależnie od temperatury badania. Kolejną zależnością jest, że dla zawartości 5,5% zeolitu uzyskano najniższe lepkości w każdej temperaturze. Z tego względu dodatek 5,5% można uznać za optymalny co potwierdza zasadność zalecanej ilości zeolitu równej 0,3% w stosunku do masy mieszanek [1–4, 6, 8, 9], co jest równe 5,5% w stosunku do masy asfaltu. Przyczyna wzrostu lepkości asfaltu z dodatkiem zeolitu może być przypisana formie dodatku, który jest w postaci ciała stałego – drobnego proszku, który po pierwotnym spienieniu w asfalcie, pozostaje nierozerpuszczony i zachowuje się jak wypełniacz.

Zmiany lepkości asfaltu z zeolitem nadal są badane przez wielu badaczy. Można znaleźć dane literackowe potwierdzające powyższe twierdzenie, że dodatek zeolitu powoduje wzrost lepkości asfaltu [1–3], jednak są też wyniki badań, które dowodzą przeciwnego twierdzenia [7, 8]. Pewne jest jednak, że takie niejednoznaczne zjawisko jest wynikiem stosowanych materiałów, które wykorzystywane są do badań: rodzaju asfaltu, jego wyjściowych właściwości oraz chemicznej budowy i pochodzenia konkretnego zastosowanego syntetycznego zeolitu.

Niewątpliwie przedmiotem dalszych badań powinna być ocena wpływu syntetycznego zeolitu na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, w szczególności na zawartość wolnych przestrzeni i odporność na oddziaływanie wody i mrozu w niższych temperaturach produkcji i zagęszczania. Taka ocena dałaby podstawę do stwierdzenia, że inne reakcje chemiczne niż zmiana lepkości asfaltu są odpowiedzialne za pozytywne działanie zeolitu jako dodatku do mieszanek mineralno-asfaltowych na ciepło.

5. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań z użyciem syntetycznego zeolitu jako dodatku do asfaltu do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych na ciepło, można wysnuć następujące wnioski:

- dodatek zeolitu do asfaltu nie powoduje zmian jego wrażliwości termicznej, co potwierdziło badanie łamliwości Fraassa, temperaturymięknienia i indeksu penetracji;
- w nieznaczny sposób dodatek zeolitu powoduje obniżenie penetracji asfaltu;
- dodatek zeolitu do asfaltu powoduje wzrost jego lepkości w rezultacie obecności bardzo drobnych cząsteczek stałych zeolitu, które po początkowym uwolnieniu wody i spowodowaniu spienienia asfaltu, pozostają nierozerpuszczone w lepiszczu.

TADEUSZ TURKIEWICZ

The State School of Higher Education in Chełm

e-mail: tturkiewicz@pwsz.chełm.pl

JACEK GÓRA

Lublin University of Technology

e-mail: j.gora@pollub.pl

WOJCIECH PIASTA

Kielce University of Technology

e-mail: wpiasta@tu.kielce.pl

THE EFFECT OF IGNEOUS ROCK AGGREGATES ON FLEXURAL AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

Abstract

The test results presented concern ordinary concretes containing 5 coarse crushed aggregates made from igneous rocks and one made from gravel. The two aggregates i.e. granite and basalt were from southwest Poland and three i.e. granite, basalt, granodiorite were from West Ukraine. Natural gravel was comparatively tested as well. The tests of aggregates dealt with bulk density, grinding ratio, content of irregular grains and content of mineral powder. Flexural and compressive strength of concretes were tested after 28 and 365 days. Better strength properties of concretes containing Polish aggregates in relation to comparable petrographic Ukrainian aggregates were found.

Keywords: igneous rock crushed aggregates, Polish aggregates, Ukrainian aggregates, flexural and compressive strength of concrete

1. Introduction

Coarse aggregate as a filler in concrete also restrains the shrinkage of cement paste. This results in considerable local stresses which may produce microcracks in the interface zone if the cement paste-aggregate bond is too weak [1]. In concrete like in other composite materials, the difference in modulus of elasticity of the matrix (mortar) and the filler (coarse aggregate) contribute to stress concentration in the interface zone, which affects the strength and overall performance of concrete. The first microcracks in concrete begin to propagate preferentially along cement paste-aggregate interfaces due to shrinkage right before loading. Low fracture strength of concrete results among others from the occurrence of shrinkage microcracks and low crack resistance of the interface zone when concrete is under load [2]. The microcracks produced locally in the interfaces initiate crack propagation between aggregate grains. Therefore, the role of coarse aggregate for fracture strength and thereby for tensile strength can be more considerable than for compressive strength. The tensile stress transfer mechanism depends on cement paste-

aggregate bond strength related to the nature, mineral composition and roughness of aggregate, as well as elastic and strength properties of aggregate [12].

In order to select the appropriate aggregate, its effect on tensile strength and crack resistance requires consideration as well. In accordance with the standards [9], tensile strength of concrete is assumed on the ground of compressive strength. It is incorrect to neglect the effect of coarse aggregate type on the tensile strength. It has been confirmed by test results [4], the tensile strength values f_{ctm} assumed by the standards are often overestimated. This is a reason for the studies of the effect of aggregate type on tensile strength of concrete.

Moreover, due to a shortage of coarse aggregate made from igneous rocks in the eastern regions of Poland for universal use, including road and bridge concrete, import of these aggregates from deposits in western Ukraine has begun. The quality and relevance of Ukrainian aggregates for concrete require investigation and checking whether they may replace the corresponding Polish aggregates.

2. Materials and test methods

There were tested 5 coarse crushed aggregates made from igneous rocks and one made from gravel. The two aggregates i.e. granite (marked BI) and basalt (BII) were from southwest Poland and the three ones i.e. granite (BIII), basalt (BIV), granodiorite (BV) were from West Ukraine. Comparatively tested was natural gravel B(VI) as well.

The tests of aggregates dealt with bulk density, grinding ratio, content of irregular grains and content of mineral powder.

Natural washed sand from Suwalki was used as fine aggregate. Its bulk density and content of dust amounted to 2.65 kg/dm^3 and 0.43%, respectively.

Each of the coarse aggregate tested was applied to cast concrete. Due to different density of coarse aggregates, their volume in each concrete type was the same. Sand content in aggregate composition, expressed by volume, amounted to 257 dm^3 .

Ordinary Portland cement CEM I 42.5R was used for each concrete. In all concretes the content of cement amounted to 350 kg/m^3 and w/c ratio was 0.55. Neither superplasticizer nor another admixture were applied. Composition of concrete mixes is given in Table 1.

Table 1. Composition of concrete mixes, kg/m^3

Components of concrete	Concrete					
	BI	B II	B III	B IV	B V	B VI
cement, kg/m^3	350	350	350	350	350	350
coarse aggregate $2\text{--}8 \text{ mm, kg/m}^3$	570	653	565	594	576	576
coarse aggregate $8\text{--}16 \text{ mm, kg/m}^3$	568	633	595	657	576	576
sand $0\text{--}2 \text{ mm, kg/m}^3$	681	681	681	681	681	681
water, dm^3/m^3	193	193	193	193	193	193
w/c ratio	0.55					

The consistency of concrete mixes, was determined by the slump [7], which was $9 \pm 3 \text{ cm}$. It corresponds to classes of S2÷S3 [10]. Air content in concrete mixes, determined by means of a pressure method was from 1.5 to 2.4%. The volumetric density of concrete mixes was tested as well [8]. Detailed test results of concrete mixes are shown in Table 2.

Table 2. Test results of concrete mixes

Concrete	Slump test result, cm	Air content, %	Bulk density, kg/dm^3
BI	5	2.0	2.39
B II	12	1.6	2.53
B III	6.5	1.5	2.43
B IV	5	1.7	2.50
B V	5	2.2	2.39
B VI	12	2.4	2.32

From each concrete mix, the following specimens were cast: 6 beams $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ and 12 cubes $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$. The beams cured for 365 days were used to test flexural strength and the cubes cured for 28 and 365 days to test compressive strength.

3. Results and analysis

3.1. Aggregates

The test results of all aggregates were referred to the requirements of the Polish standards [5] in the first place. The requirements relating to the tested properties of aggregates are presented in Table 3.

Table 3. Codes rules in scope of tested aggregates according to PN-86/B-06712 [5]

No.	Properties of aggregates (table presents maximum permissible values)	Igneous and metamorphic rocks		Gravel	
		aggregate class		aggregate class	
		20	30	50	10
1	Resistance to crushing and grinding ratio, %	16	12	8	24
2	Content of irregular grains, %	25	20	10	30
3	Content of mineral dust, %	3.0	1.5	1.0	3.0

The research of physical and mechanical properties was conducted both with respect to aggregates applied, as well as concretes made with their use. The results are shown in Table 4 and 5, respectively.

Table 4. Tests results of aggregates properties

Aggregate type	Fraction mm-mm	Tested property						
		Bulk density	Grinding ratio		Content of irregular grains		Content of mineral powder	
		kg/dm ³	X _{ri} , %	X _{rm} , %	Z _{ri} , %	Z _{nm} , %	Z _{pi} , %	Z _{pm} , %
granite pl (I)	2-8	2.60	14.9	15.1	4.9	3.0	0.16	0.13
	8-16		15.3		1.6		0.10	
basalt pl (II)	2-8	2.94	4.3	4.6	5.7	4.2	0.40	0.35
	8-16		4.9		2.7		0.30	
granite uk (III)	2-8	2.65	5.9	8.0	3.5	4.2	0.27	0.26
	8-16		9.8		4.8		0.24	
basalt uk (IV)	2-8	2.86	3.9	6.6	6.1	6.6	0.68	0.66
	8-16		8.5		6.9		0.65	
granodiorite uk (V)	2-8	2.63	6.2	6.0	10.3	8.3	0.28	0.26
	8-16		5.8		6.7		0.24	
gravel pl (VI)	2-8	2.63	7.5	9.3	0.7	3.1	0.22	0.21
	8-16		10.6		5.0		0.20	

Table 5. Test results of concrete strength

Concrete	Mean compressive strength, MPa				Mean flexural strength, MPa	
	28 days	s, MPa	365 days	s, MPa	365 days	s, MPa
		v, %		v, %		v, %
BI (granite pl)	45.1	1.48	51.1	2.06	4.95	0.17
		3.3		4.0		3.5
BII (basalt pl)	47.1	1.20	51.5	1.81	5.20	0.13
		2.5		3.5		2.4
BIII (granite uk)	43.4	1.64	47.3	2.06	4.38	0.21
		3.8		4.4		4.7
BIV (basalt uk)	46.0	1.75	50.4	1.96	4.96	0.18
		3.8		3.9		3.7
BV (granodiorite uk)	43.4	2.26	48.5	3.37	4.60	0.24
		5.2		6.9		5.1
BVI (gravel pl)	42.0	2.39	50.1	2.21	5.02	0.17
		5.7		4.4		3.4

In Poland, for many years it has been the compressive strength that constituted the base for qualitative assessment of aggregate in scope of mechanical properties, measured by means of the grinding ratio. This was confirmed by the requirements of PN-B-06250:1988 [6], according to which, if not provided otherwise in the subject standards for products, components and structures,

it is recommended to use aggregate of a class not worse than that of concrete. In today's standards, one cannot find that type of recommendations, however it shall be taken for granted that they were created on the basis of many years' experience, although scientific research suggests that there are exceptions to this rule in some cases. Considering the results of aggregate tests obtained, all types of aggregate

need to be classified, with the exception of granite pl (I), as aggregate class 50, that is as concretes of all strength classes according to [6]. However, granite pl (I) was classified as class 20, which means that it should be used, according to the standards [6] in concrete classes of C16/20 at the most. Regarding the resistance to crushing, gravel represents the highest class within its group that is class 30.

Analyzing test results of the content of irregular grains and mineral dust, all tested aggregates were classified as top class aggregates [5]. This means that in the former case the content of 10% was not exceeded and in the latter of 1% (for gravel 1.5%). The biggest content of irregular grains 8.3% was determined for the granodiorite uk (V), and in the case of mineral dust content 0.66% for basalt uk (IV).

Summarizing the aforesaid, all tested aggregates in terms of their properties subjected to tests, can be classified as high quality aggregates according to [5]. The exception is granite (I), classified as the lowest class 20, due to the result of crushing strength test.

3.2. Concretes

According to the compliance criteria set out in PN-EN 206-1:2003 [10] all concretes were classified as concrete compressive strength class C30/37. The difference in extreme values of average compressive strength after 28 days of curing between concretes (BII) basalt pl and B (III) granite uk is 12% (Fig. 1).

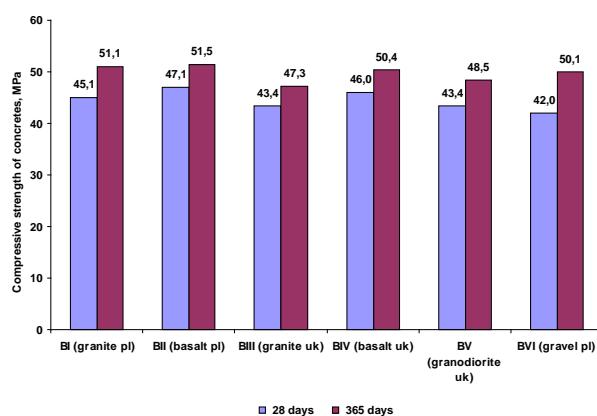


Fig. 1. Mean compressive strength of concretes cured 28 and 365 days

After 365 days, the difference was reduced to 9%, however it no longer referred to the same concretes. A bigger diversity was found in the case of flexural strength between the largest (BII) and smallest (BIII) value, and it is 19%. The best strength properties were found in the case of concrete made from Polish basalt aggregate (II), compressive strength after 365

days is 51.5 MPa and flexural strength is 5.20 MPa. The lowest strength values, however were found in the case of concrete with Ukrainian granite aggregate (III), 47.3 MPa for compressive strength and 4.38 MPa (Table 5) for flexural strength, respectively.

Comparing the results of strength tests of concrete made from relevant Polish and Ukrainian aggregates, slightly higher values in the case of concrete made from Polish aggregates were found. After 365 days, concrete BII (basalt pl) had the compressive strength of about 2% bigger than that of concrete BIV (basalt uk), and flexural strength of about 5%. However, differences in the strength of concrete with granite aggregates, concretes BI (granite pl) and BIII (granite uk) are 8% and 13% respectively, and in the case of granodiorite, concretes BI (granite pl) and BV (granodiorite uk) 5% and 8%. While considering test results in the case of comparative concrete BVI (gravel pl), the comparable strength properties were achieved (concrete BIV basalt uk) or bigger than in the case of Ukrainian aggregates. Considering better mechanical adhesion of cement paste to crushed aggregates than to oval and smooth gravel, these results seem to be quite surprising. It should be further noted that the biggest increase among all concretes (over 8 MPa i.e. almost 20%) of strength was after 365 days. Such good strength properties of concrete with gravel – especially after one year – are due to mineral composition of the grains. According to the research carried out by X-ray diffraction, about half of the grains of gravel were from carbonate rocks and contained calcite or a mixture of calcite and dolomite. However, these minerals react with the paste in the contact layer after some time, increasing adhesion of the aggregate to the hardened paste [3, 11, 13].

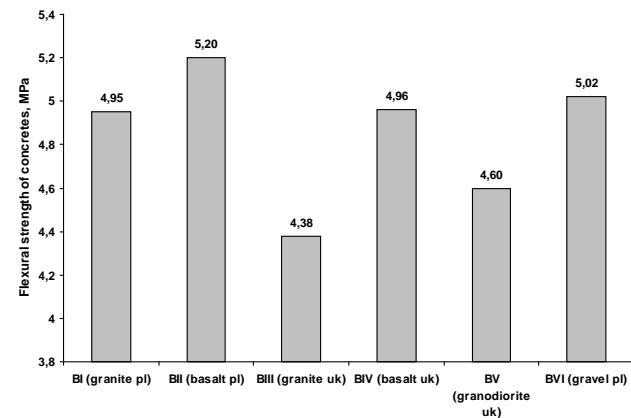


Fig. 2. Mean flexural strength of concretes cured 365 days

4. Conclusions

Despite the lowest resistance to crushing of granite aggregate from Siedlimowice near Strzegom, better strength characteristics of concrete in relation to comparable petrographic Ukrainian aggregates were found.

Comparing the results of concrete tests, the highest strength were obtained using basalt aggregate from the Winna Góra mine, and the lowest ones with granite aggregate from the Vyrivskij Karjer (III) mine. Nonetheless, all kinds of concrete were assigned to the same class of compressive strength.

High strength of concrete with gravel aggregate was related to the content of grains of carbonate rocks, which provided a stronger cement paste-aggregate interface zone.

References

- [1] Appa Rao G., Raghu Prasad B.K., *Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength*, Cement and Concrete Research 32 (2002), 253–257
- [2] Caliskan S., Karihaloo B.L., Barr B.I.G., *Study of rock mortar interfaces. Part I: Surface roughness of rock aggregates and microstructural characteristics of interface*. Magazine of Concrete Research, 54, (2002) 449-461
- [3] Interfacial transition zone in cement, E&FN Spon, London 1996
- [4] Piasta W., Budzyński W., Góra J., *Wytrzymałość na rozciąganie betonów zwykłych i wysokiej wytrzymałości z kruszwyami ze skał magmowych i osadowych (Splitting tensile strength of normal and high strength concretes with aggregates from volcanic and sedimentary rocks)*, Przegląd Budowlany 10/2011, s. 62–67
- [5] PN-B-06712:1986 Kruszywa mineralne do betonu (Mineral aggregates for concrete)
- [6] PN-B-06250:1988 Beton zwykły (Normal concrete)
- [7] PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka (Testing fresh concrete. Part 2: Slump-test)
- [8] PN-EN 12350-6:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość (Testing fresh concrete. Part 6: Density)
- [9] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków (Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings)
- [10] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność (Concrete. Part 1: Specifications, performances, production and conformity)
- [11] Roy D.M., Langton C.A., *Morphology and Microstructure of Cement Paste-Rock Interfacial Regions*, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris (1980), pp. 127–132
- [12] Saito M., Kawamura M., *Resistance of the cement-aggregate interfacial zone to propagation of cracks*, Cement and Concrete Research 16 (1986), pp. 653–661
- [13] Zimbelmann R., *A Contribution to the Problem of Cement-Aggregate Bond*, Cement and Concrete Research, Vol. 15 (1985), pp. 801–808

Tadeusz Turkiewicz
Jacek Góra
Wojciech Piasta

Wpływ kruszyw ze skał magmowych na wytrzymałość betonu na zginanie i ściskanie

1. Wprowadzenie

Kruszywo grube pełniąc rolę wypełniacza w betonie, ogranicza także skurcz zaczynu cementowego. Wywołuje to lokalnie naprężenia, które powodują powstawanie mikrorys w strefie przejściowej zaczyn-kruszywo, jeśli przyczepność zaczynu do kruszywa jest zbyt mała [1]. W betonie podobnie jak w innych

materiałach kompozytowych, różnice w modułach sprężystości matrycy (zaprawy) i wypełniacza (kruszywa grubego) przyczyniają się do koncentracji naprężeń w strefie przejściowej, która wpływa na wytrzymałość i inne cechy betonu. Mała wytrzymałość betonu na rozciąganie wynika m.in. z występowania mikrorys skurczowych i małej rysoodporności strefy

przejściowej [2]. Utworzone lokalnie w strefach mikrorysy inicjują propagację rys pomiędzy ziarnami kruszywa. Dlatego rola kruszywa grubego dla rysoodporności, a poprzez to wytrzymałości na rozciąganie może być znacznie ważniejsza niż dla wytrzymałości na ściskanie. Mechanizm transferu naprężeń rozciągających zależy od przyczepności zaczynu do kruszywa, która jest związana z rodzajem, składem mineralnym i szorstkością kruszywa, a także właściwościami sprężystymi i wytrzymałościowymi kruszywa [12].

Dokonując wyboru właściwego kruszywa do betonu należy również zwrócić uwagę na jego wpływ na wytrzymałość na rozciąganie i rysoodporność. Brak uwzględnienia w zapisach normowych [9] wpływu rodzaju kruszywa grubego na wytrzymałość betonu na rozciąganie i uzależnianie jej wyłącznie od wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie jest niesłuszne. W wielu przypadkach, potwierdzają to wyniki badań [4], normowe wartości wytrzymałości f_{ctm} są w wielu przypadkach przeszacowane. Powyższe stwierdzenie jest kolejną przesłanką podjęcia się badań wpływu kruszywa na wytrzymałość betonu na rozciąganie.

Ze względu na niedobór we wschodnich regionach Polski kruszyw grubych ze skał magmowych o uniwersalnym przeznaczeniu, w tym do wykonywania betonów drogowych i mostowych, kruszywa te zaczęto importować ze złóż w zachodniej Ukrainie. Jakość i przydatność kruszyw ukraińskich do betonów należy zbadać i sprawdzić, czy mogą zastąpić odpowiednie kruszywa polskie.

2. Materiały i metody badań

Badaniom poddano pięć kruszyw łamanych ze skał magmowych i jedno żwirowe. Dwa kruszywa pochodziły z południowo-zachodniej Polski – granit z Siedlimowic k. Strzegomia (oznaczenie I) i bazalt z Winniej Góry k. Piotrowic (II), a trzy z zachodniej Ukrainy – granit z kopalni Vyrivskij Karjer (III), bazalt z kopalni Iwaniczi (IV) oraz granodioryt z kopalni Klesov (V). Ponadto porównawczo zastosowano kruszywo naturalne otoczakowe z Sokółki k. Suwałk (VI).

Kruszywa przebadano w zakresie gęstości objętościowej, wytrzymałości na miazdżenie (określono wartości wskaźników rozkruszenia), zawartości ziaren nieforemnych oraz zawartości pyłów.

Jako kruszywo drobne zastosowano piasek naturalny, plukany z KSM Suwałki. Dla piasku wykonano badania gęstości pozornej i zawartości pyłów, które wyniosły odpowiednio $2,65 \text{ kg/dm}^3$ i $0,43\%$.

Z każdym z badanych kruszyw grubych wykonano betony. Ze względu na różne gęstości objętościowe poszczególnych kruszyw grubych ich objętość w każdym betonie była taka sama. Objętościowa zawartość piasku w składzie kruszywa wynosiła $257,0 \text{ dm}^3$.

Do każdego z betonów użyto tego samego cementu CEM I 42,5 R. We wszystkich betonach zachowano ten sam współczynnik $w/c = 0,55$ i stałe ilości cementu wynoszące 350 kg na 1 m^3 mieszanki. Do mieszanek betonowych nie stosowano żadnych dodatków i domieszek. Skład mieszanek betonowych został podany w tabeli 1.

Konsystencja mieszanek betonowych badana za pomocą metody opadu stożka [7], wyniosła $9 \pm 3\text{cm}$, co odpowiada klasie konsystencji S2/S3 [10]. Zawartość powietrza mierzona metodą ciśnieniową mieściła się w granicach od 1,5 do 2,4%. Zbadano również gęstość objętościową przygotowywanych mieszanek [8]. Szczegółowe wyniki badań mieszanek betonowych zawiera tabela 2.

Z każdego rodzaju mieszanki betonowej wykonano 6 belek o wymiarach $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ do badania wytrzymałości na zginanie i 12 próbek sześciennych o boku 100 mm do badania wytrzymałości na ściskanie. Badanie zginania wykonano po 365 dniach przechowywania próbek, a badania ściskania po 28 i 365 dniach.

3. Wyniki i analiza badań

3.1. Kruszywa

Badaniem właściwości fizycznych i mechanicznych poddano zarówno stosowane kruszywa jak i betony wykonane z nich zastosowaniem. Wyniki zamieszczone odpowiednio w tabelach 4 i 5.

Uzyskane wyniki badań wszystkich kruszyw w pierwszej kolejności odniesiono do wymagań określonych w polskich normach [5]. W tabeli 3 przytoczono wymagania w odniesieniu do badanych właściwości kruszyw.

W Polsce przez wiele lat w ocenie jakościowej kruszyw, w zakresie właściwości mechanicznych jako podstawową przyjmowano wytrzymałość na miazdżenie, której miarą jest wskaźnik rozkruszenia. Potwierdzono to wymaganiami normy PN-B-06250:1988 [6], zgodnie z którą, jeśli w normach przedmiotowych na wyroby, elementy i konstrukcje nie postanowiono inaczej, zaleca się stosowanie kruszywa o marce nie niższej niż klasa betonu. W obecnych normach nie znajduje się tego typu wskazań, jednak należy uznać, że powstały one na podstawie wieloletnich doświadczeń, choć badania naukowe

wskazują, że w pewnych przypadkach istnieją odstępstwa od tej reguły. Uwzględniając otrzymane wyniki badań kruszyw, należy sklasyfikować wszystkie, z wyłączeniem granitu pl (I), do marki kruszywa 50, czyli do betonów wszystkich klas wytrzymałościowych według [6]. Natomiast granit pl (I) został sklasyfikowany do marki 20, co oznacza, że powinien według wymagań normy [6] być stosowany do betonów klas co najwyżej C16/20. Kruszywo żwirowe w zakresie wytrzymałości na miazdżenie odpowiada najwyższej w swojej grupie marce 30.

Analizując wyniki badań zawartości ziaren nieforemnych oraz pyłów mineralnych, wszystkie badane kruszywa zaklasyfikowano do najwyższej marki kruszywa [5]. Oznacza to, że w pierwszym przypadku nie została przekroczona zawartość 10%, a w drugim 1% (dla żwiru 1,5%). Najwyższą zawartość ziaren nieforemnych 8,3% określono dla granodiorytu uk (V), a w przypadku zawartości pyłów mineralnych 0,66% dla bazaltu uk (IV).

Podsumowując, wszystkie badane kruszywa w zakresie badanych właściwości, można sklasyfikować jako wysokiej jakości [5]. Wyjątek stanowi granit pl (I), sklasyfikowany do najniższej marki 20, ze względu na wynik badania wytrzymałości na miazdżenie.

3.2. Betony

Zgodnie z kryteriami zgodności określonymi w PN-EN 206-1:2003 [10] wszystkie badane betony sklasyfikowano do klasy wytrzymałości na ściskanie C30/37. Różnica w skrajnych wartościach średnich wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania pomiędzy betonami (BII) bazalt pl i B(III) granit uk, wynosi 12%. Po 365 dniach różnica zmniejszyła się do 9%, ale nie dotyczy już tych samych betonów. Większe zróżnicowanie stwierdzono w przypadku wytrzymałości na zginanie, pomiędzy największą (BII) i najmniejszą (BIII) wartością, jest to 19%. Najlepsze właściwości wytrzymałościowe stwierdzono w przypadku betonu z kruszywem bazaltowym polskim (II), wytrzymałość na ściskanie po 365 dniach wynosi 51,5 MPa, a na zginanie 5,20 MPa. Z kolei najmniejsze wartości wytrzymałości stwierdzono w przypadku betonu z kruszywem granitowym ukraińskim (III), odpowiednio na ściskanie 47,3 MPa i na zginanie 4,38 MPa (tab. 5).

Porównując wyniki badań wytrzymałościowych betonów wykonanych z odpowiednimi kruszycami polskimi i ukraińskimi, stwierdzono nieznacznie większe wartości w przypadku betonów z rodzimymi kruszycami. Beton BII (bazalt pl) ma wytrzymałość naści-

skanie po 365 dniach o około 2% większą od betonu BIV (bazalt uk), a na zginanie o około 5%. Natomiast różnice wytrzymałości betonów z kruszycami granitowymi, betony BI (granit pl) oraz BIII (granit uk), wynoszą odpowiednio 8% i 13%, a w przypadku granodiorytu, betony BI (granit pl) oraz BV (granodioryt uk), odpowiednio 5% i 8%. Rozważając wyniki badań w przypadku porównawczego betonu BVI (żwir pl), osiągnięto porównywalne wytrzymałości (beton BIV bazalt uk) lub większe niż w przypadku kruszyw ukraińskich. Biorąc pod uwagę lepszą mechaniczną przyczepność zaczynu cementowego do kruszyw łamanych niż do ovalnych i gładkich żwirowych, wyniki te wydają się dość zaskakujące. W tym miejscu należy dodatkowo podkreślić największy wśród wszystkich betonów przyrost (ponad 8 MPa, czyli blisko 20%) wytrzymałości do 365 dni. Tak dobre właściwości wytrzymałościowe betonu ze żwirem – szczególnie w wieku 1 roku – pozwala wyjaśnić skład mineralny jego ziaren. Jak wynika z badań przeprowadzonych za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej około połowy ziaren żwiru pochodziło ze skał węglanowych i zawierało kalcyt lub mieszaninę kalcytu i dolomitu. Natomiast minerały te w warstwie kontaktowej reagują w czasie z zaczynem, zwiększać przyczepność kruszywa do stwardniałego zaczynu [3, 11, 13].

Porównanie wyników badań wytrzymałości na ściskanie i zginanie dla betonów wykonanych z poszczególnych kruszyw przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

4. Wnioski

Pomimo najwyższej wytrzymałości na miazdżenie kruszywa granitowego z Siedlimowic k. Strzegomia stwierdzono lepsze charakterystyki wytrzymałościowe betonów w odniesieniu do porównywalnych petrograficznie kruszyw ukraińskich.

Porównując wyniki badań betonów, największe wartości uzyskano stosując kruszywo bazaltowe z kopalni Winna Góra, a najmniejsze stosując kruszywo granitowe z kopalni Vyrivskij Karjer (III). Mimo to, wszystkie betony zostały zaliczone do tej samej klasy wytrzymałości na ściskanie.

Wysoka wytrzymałość betonu z kruszywem żwirowym związana była z zawartością w nim ziaren ze skał węglanowych, zapewniających mocniejszą warstwę przejściową kruszywo-zaczyn.

JOANNA GIL-MASTALERZYK

Kielce University of Technology
 Faculty of Civil Engineering and Architecture
 Department of Architecture and Town Planning
 e-mail: jmastalerzyk@tu.kielce.pl

COMMONALITY OF CONCRETE IN CONTEMPORARY SACRED ARCHITECTURE

Abstract

Concrete (reinforced) is an important measure in the process of materialization of contemporary architecture. At the core of the new directions and the architecture of the twentieth century reinforced concrete played a special role as a material extremely flexible, perfectly suitable for obtaining new aesthetic values, textural and structural. As a building material architectural form, with unlimited possibilities, played a significant role in shaping lumps of contemporary sacred objects in Poland and in the world.

Keywords: church architecture, architecture, concrete, church

1. Introduction

After 1945, concrete (reinforced) has become an important instrument in the creation of architectural quality. It is an important measure in the process of materialization of contemporary architecture. At the core of the new directions and the architecture of the twentieth century reinforced concrete played a special role as a material perfectly suitable for obtaining new aesthetic values, textural and structural. About the unlimited possibilities of its use was influenced by many aspects, predominantly its physical / structural construction, economic and aesthetic value. As a building material architectural form has played a significant role in shaping lumps of contemporary sacred objects in Poland and in the world.

2. Concrete (reinforced) ideal architectural material in the shaping of forms of worship

Concrete for the first time played the role of a valuable architectural material in church at the beginning of the twentieth century. A special and, at the same time, a turning point in the perception of the aesthetics of concrete was the church of Notre Dame du Raincy of 1922. Designer Auguste Perrot applied raw concrete consciously in a monumental building (not as before only in factories or halls), with the imprint left behind carefully drawing the formwork. Due to limited financial resources allocated for the implementation of this project, Perrot made the first example of „dirty concrete” [1].

In contrast to traditional formal solutions Perrot, modeled on the doctrines of the Violet-le-Duc, the French architect Le Corbusier in his projects and realizations presented in full brutality of concrete – in the contemporary avant-garde form. To meet the new aesthetic possibilities of concrete designed among other things, the church of Notre-Dame-du-Haut in Ronchamp and La Tourette monastery was founded in Eveux. In embodiments of these it was shown how (reinforced) loses its rigidity and becomes an organic structure.

Projects by Le Corbusier, presenting a consistent continuation of the aesthetics of concrete, has also become a source of inspiration for architects – representing the Cracow school of architecture – creating projects with its use. Concrete ceased to be perceived as a material with the characteristics of a purely utilitarian, became a means of expression to materialize the aesthetic architectural thought [2]. Dariusz Kozłowski attributed his soul: *Concrete is – the soul of this metaphorical statement recalls the first association anthropomorphic – watching the architectural concrete exteriority associate with her, watching her “skin” to assess the form. When reflection or curiosity requires insight into, you can see the power of the material, the force running inside the structure - sometimes taking the sensed only system, hidden there, the steel parts. Sometimes you can see the soul of concrete – the shape of things to reveal it only possible connections – a beautiful, purpose, persistence effect of the human imagination* [3].



Fig. 1. The sacral center Resurrectionis XX.
Zmartwychwstańców in Cracow, 1985–1993, project
by Dariusz Kozłowski, Waclaw Stefański, Maria
Misiągiewicz; view of a fragment from the street frontage.
Ks. Pawlicki, concrete wall torn stressing the main entrance



Fig. 2. The sacral center Resurrectionis XX.
Zmartwychwstańców in Cracow, 1985–1993, project
by Dariusz Kozłowski, Waclaw Stefański, Maria
Misiągiewicz; view of the facade of the building seminar
from inner courtyard



Fig. 3. The sacral center Resurrectionis XX.
Zmartwychwstańców in Cracow, 1985–1993, project
by Dariusz Kozłowski, Waclaw Stefański, Maria
Misiągiewicz; Emmaus, a view of the facade from the
chancel

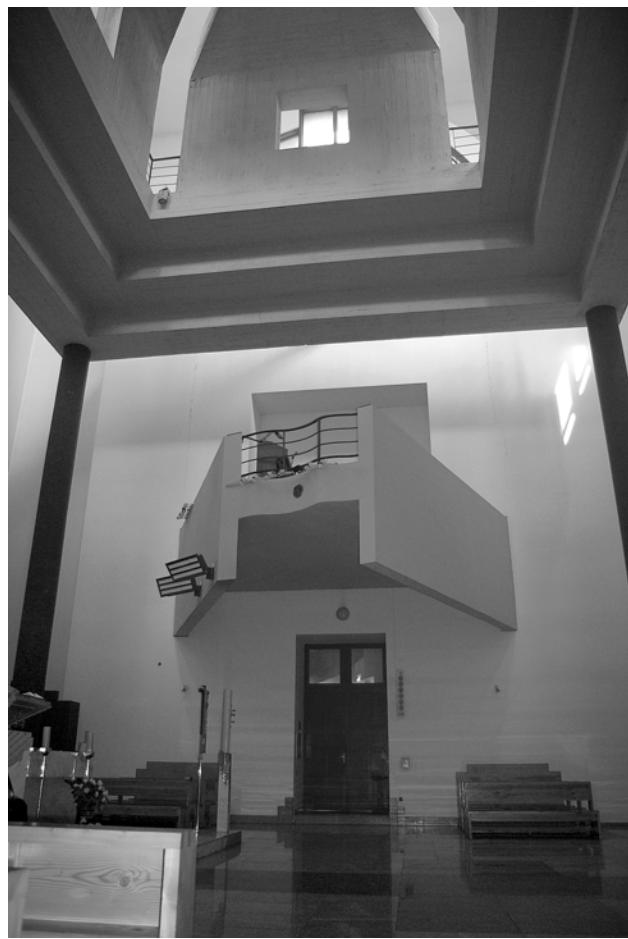


Fig. 4. The sacral center Resurrectionis XX.
Zmartwychwstańców in Cracow, 1985–1993, project
by Dariusz Kozłowski, Waclaw Stefański, Maria
Misiągiewicz; view of the choir and a piece of concrete
formwork confessions of imprint

Raw concrete artistic qualities, inherent in his nature, Dariusz Kozłowski used and introduced the band sacred center of the "Zmartwychwstańcy" in Zakrzówek in Cracow, realized in style surreal (by Dariusz Kozłowski, Waclaw Stefanski and Maria Misiągiewicz). Becomes particularly evident in the architecture of the building and its surroundings use of the concrete, both as construction and the finishing material.

The complex of the "Zmartwychwstańcy" in addition to the wealth of detail and variety of materials, has been shown scaled to the entire facade, torn and ragged at the edges of the huge reinforced concrete wall, emphasizing the main entrance to the system. In contrast, raw concrete facade of the church Emmaus stands illusionistic relief repeating pattern "of the chapel dome" [4]. From the street Ks. Pawlicki and inputs, the enormous size "monastery wall" was designed – in the form of massive concrete arches – surrounding the building seminar. Form arcades, is a rhythmic, repetitive pillars and an aesthetic limitation - the closure of the composition of the town.



Fig. 5. The sacral center Resurrectionis XX.
Zmartwychwstańców in Cracow, 1985–1993, project
by Dariusz Kozłowski, Waclaw Stefanski, Maria
Misiągiewicz; fragment of the interior, finish reinforced
concrete ceiling

Buildings were erected in the center of technology and reinforced concrete masonry, reinforced concrete floors poured wet the walls of the monastery – reinforced concrete. The exterior finish used values of raw reinforced concrete [5]. Inside, in addition to simple plaster, concrete was introduced – to "vault" and left uncovered concrete castings. Special attention was paid to concrete floors (with traces of formwork) in the chapels. Suspended them carrying nothing "vault", with irregular shapes. Inside the house chapel of St. Joseph, suspended above the altar dominating the whole interior, heavy irregular reinforced concrete block, called "cloud". In the library, "House of the Sisters" designed vault that has changed in *the decomposed negative afterimage of covering baroque chapel* [6].

The idea of composing space with a variety of textures used and the context of concrete with other materials, contribute to the mood of sacred space and allow you to specify it as poetry, and her creator highly admire him among *the poets of the concrete* [7] (Fig. 1–6).



Fig. 6. The sacral center Resurrectionis XX.
Zmartwychwstańców in Cracow, 1985–1993, project
by Dariusz Kozłowski, Waclaw Stefanski, Maria
Misiągiewicz; fragment of the interior, finish reinforced
concrete ceiling

An example of a work of groundbreaking, not only in the Archdiocese of Cracow, but in the whole country, implementing the provisions of the conciliar functional solutions, is the church of the "Arka Pana" in Cracow – Nowa Huta, by Wojciech Pietrzyk [8]. Due to the materials used (concrete, reinforced concrete and steel and glass), the formation of solid architectural, aesthetic forms, the use of new technologies, the use of which has given rise to single-space object, it is the first modern post-Vatican II religious building of the church and the church of Cracow in Poland. The property was built in system permeating the concrete shell. High cross made of stainless steel, is a major structural component of the structure, supports and maintains the concrete walls consisting of eighteen steel structure spans the object. The walls are constructed of reinforced concrete and glass. Concrete external walls are covered with gray stone. From inside these walls lean slightly toward the center. Simple and logical design object has become a support for the architectural concept and development of its forms [9].

The Church in its form differs from the existing rectangular sacred objects, because its implementation was extremely complicated. This process is described by T. Przemysław Szafer: *author and implementer of the church (...), all based on writing project documentation resulting from the mapping of individual points from the model coordinate system. The basic documentation has become in this case did not file the drawings, a set of tens of thousands of three-digit numbers. Appointment of them on the site followed by a simple meter and vertical scale, which proved to be sufficiently accurate instruments here* [10].

The church is irregular and expressive. It consists of sculptural, soft and liquid forms, as from the east, and reaching high above the roof of a concrete wall, while the west-dynamically detached from the earth "wall sail", resembling the shape of an ark. Property in addition to the wealth of forms characterized by a variety of materials and wealth detaili, occurring both external as well as internal design of the temple. Interesting and very carefully untied the designer calls occurring in the interior of the temple of concrete with glass and wood. One of the architectural solutions - a combination of wood in the form of shingles on the ceiling of the concrete wall - using steel, other wood, glass and concrete – to contact "*the bottom of the Arka Pana*" [11]. Meaningful object architecture, a great variety of shapes, forms and amaze innovative design solutions. Both formal solutions, organization

of space and the way climb the temple became the model for emerging after 1980 years later churches (Fig. 7–10).

In the design of reinforced concrete, poured out evenly and consistently imprinted boarded formwork, raw texture of concrete, acting ascetic decoration of the exterior walls and interior – church was realized. Church St. Queen Jadwiga in Cracow, project by Romuald Loegler and Jacek Czekaj, belongs to the mainstream of mature, late modernism. The main body of the object was built with pure geometric forms of reinforced concrete as a deconstructed cube. The whole assumption of the design was based on the rules of geometry. By design, Romuald Loegler, the process of creating architectural object described as follows: (...) *developed architectural blocks of the church was based on the assumption that architecture is interdependent on the design, the sculptural elements are shaped by its nature, is an exponent of detail and aesthetic values* [12].

Entire place was made of reinforced concrete. The planes carry concrete symbolic. Raw interior is characterized by asceticism and the absence of unnecessary ornamentation and details. Mainly dominated by gray tone concrete walls, which gives a very monumental nature of the object and creates a bit chilly, but the emotional mood (Fig. 11–14).

3. Conclusions

The architecture of churches designed and implemented in our country – after 70 years' use of construction material which was reinforced, significantly influence the form of the modern temples – increasing the scale and scope of freedom in shaping the architecture. Reinforced concrete as a construction material has created enormous opportunities in the realization of contemporary architecture. It possible to overcome the increasing span and height. Decided to unlimited possibilities of forming any lumps. This greatly influenced the interior spatial solutions – enabling the execution of covers for large spans and giving the impression of uniformity space [13].

Raw concrete (reinforced) also plays an important role in the implementation of the plastic expression of worship. The use of natural fingerprints formwork and boards, with no trace of smoothing imperfections and random residual performance, revived the concrete surface and gave its original value. Concrete has become such an ideal material in modern architecture church architecture, possessing high qualities and aesthetics.



Fig. 7. Church "Arka Pana" in Cracow – Nowa Huta; 1967–1977, project by Wojciech Pietrzyk; Call one of the architectural concrete and glass exterior walls, the view from the outside – from the north



Fig. 8. Church "Arka Pana" in Cracow – Nowa Huta; 1967–1977, project by Wojciech Pietrzyk; entrance to the main level of the church, the view from the terrace outside

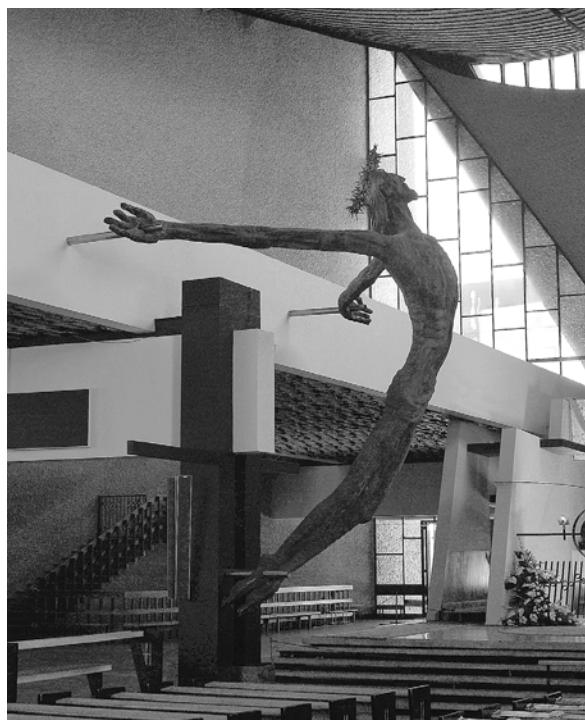


Fig. 9. Church "Arka Pana" in Cracow – Nowa Huta; 1967–1977, project by Wojciech Pietrzyk; perspective interior view of the bronze sculpture of Christ Triumphant and the altar, sculpture – designed by Wojciech Pietrzyk, made B. Chromy



Fig. 10. Church "Arka Pana" in Cracow – Nowa Huta; 1967–1977, project by Wojciech Pietrzyk; combination of glass with concrete, cover the stairs leading to the roof, the view from the inside



Fig. 11. Church of Saint Queen Jadwiga in Cracow, 1978–1988, project by Romuald Loegler, Jacek Czekaj; perspective view of the solid from the north



Fig. 12. Church of Saint Queen Jadwiga in Cracow, 1978–1988, project by Romuald Loegler, Jacek Czekaj; perspective view of the solid wall of the facade of the main entrance from the north-east



Fig. 13. Church of Saint Queen Jadwiga in Cracow, 1978–1988, project by Romuald Loegler, Jacek Czekaj; perspective interior view of the Fireflies dissecting reinforced concrete walls



Fig. 14. Church of Saint Queen Jadwiga in Cracow, 1978–1988, project by Romuald Loegler, Jacek Czekaj; perspective interior view of the wall of the altar

This material in relation to both physical and metaphorical nature, remains a universal architectural material. Modern technologies, unlimited design possibilities, material solutions and their availability enabled extremely flexible abilities of its processing, creating unlimited structural systems in the field of solids and disposal of the interior.

In conclusion, you can stop at the words of Maria Misiągiewicz, *who wrote that the talent of the author depends on whether the rise from it in favor of the ordinary, unusual work, or the work of the immortal* [14]. Discussion on the concrete architecture continues. Evidence of this sphere of architectural events, including a series of annual edition of the National Competition *Concrete Architecture*.

References

- [1] Bigaj P., *Beton (żelbet) – uniwersalizm architektonicznego tworzywa*, Czasopismo Techniczne, Architektura, z. 9-A/2006, rok 103, special edition; *Definiowanie przestrzeni architektonicznej*, Architektoniczne tworzywo, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006, p. 161, source: P. Collins, *The Classicism of Auguste Perret*, [w:] P. Collins, *Concrete, The Vision of a New Architecture*, McGillQueen's University Press, Montreal & Kingston 2004, s. 306.
- [2] Bigaj P., *Beton (żelbet) – uniwersalizm architektonicznego tworzywa*, Czasopismo Techniczne, Architektura, z. 9-A/2006, rok 103, special edition; *Definiowanie przestrzeni architektonicznej*, Architektoniczne tworzywo, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006, s. 163.
- [3] Kozłowski D., *O naturze betonu – czyli idee, metafory i abstrakcje*, Architektura betonowa. Kozłowski D., (red.), Kraków 2001, s. 5.
- [4] Kozłowski D., *Projekty i budynki 1982-1992. Figuratywność i rozpad formy w architekturze doby postfunkcjonalnej*, Kraków 1992, s. 68.
- [5] Kozłowski D., 2 projekty. *Droga Czterech Bram, Wyższe Seminarium Duchowne Zgromadzenia XX Zmartwychwstańców. Dom Alchemików*, Wytwórnia kosmetyków HEAN, Kraków 1994, s. 7.
- [6] Kozłowski D., *Projekty i budynki 1982-1992...*, op. cit., s. 66–67.
- [7] Kucza-Kuczyński K., *Sakralizacja betonu*, Architektura betonowa, Dariusz Kozłowski, (red.), Kraków 2001, s. 47–57.
- [8] Design of the church was founded in 1957, and the realization lasted from 1967 to 1977, for: Ks. H. Nadrowski, *Kościoły naszych czasów. Dziedzictwo i perspektywy*, Kraków, 2000, s. 58–59; The design by Jan Grabacki. Construction manager was Jan Norek, a foreman Antanii Pietraszek, for: ks. Gorzelany J., *Arka Pana, Nasza rodzina numero spécial 1989*, Paris 1988, s. 42; The area of the nave is 1300 m² and can accommodate a number of 4000 people. Cubic – about 30 000 m³, za: T. P. Szafer, *Nowa architektura polska, Diariusz lat 1971-1975*, Warszawa 1979, s. 171.
- [9] Gil-Mastalerczyk J., *O przemianach architektury sakralnej Archidiecezji Krakowskiej w latach 1945-2000*, doctoral dissertation under the direction of prof. Andrzej BIAŁKIEWICZ, Cracow 2013, for: T. Szafer, *Nowa architektura polska, Diariusz lat 1971-1975*, Warszawa 1979, s. 171.
- [10] Szafer T.P. *Nowa architektura polska, Diariusz lat 1976-1980*, Warszawa 1981, s. 175–176.
- [11] ks. Gorzelany J., *Arka Pana, Nasza rodzina numero spécial 1989*, Paris 1988, s. 53–55.
- [12] Loegler R., *Z porządku uwolniona forma*, Kraków 2001, p. 89.
- [13] Gil-Mastalerczyk J., *O przemianach architektury sakralnej Archidiecezji Krakowskiej w latach 1945-2000*, doctoral dissertation under the direction of prof. Andrzej Bialkiewicz, Cracow 2013.
- [14] Misiągiewicz M., *Punkt widzenia. Rozmowa ze studentami: architektoniczne tworzywo* [w:] Czasopismo Techniczne, Architektura, z. 9-A/2006, rok 103, special edition; *Definiowanie przestrzeni architektonicznej*, Architektoniczne tworzywo, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006, s. 452.

Joanna Gil-Mastalerzyk

Uniwersalizm betonu we współczesnej architekturze sakralnej

1. Wstęp

Po roku 1945 beton (żelbet) stał się ważnym instrumentem w kreowaniu jakości architektonicznej. Jest istotnym środkiem w procesie materializowania współczesnej myśli architektonicznej. U podstaw nowych kierunków i idei architektury XX wieku szczególną rolę odegrał beton zbrojony jako tworzywo znakomicie nadające się do uzyskiwania nowych walorów plastycznych, fakturowych oraz konstrukcyjnych. O nieograniczonych możliwościach jego wykorzystania zadecydowało wiele aspektów, przede wszystkim jego właściwości fizyczne/budowlano-konstrukcyjne, ekonomiczne oraz walory estetyczne. Jako materiał budujący formę architektoniczną odegrał znaczącą rolę w kształtowaniu brył współczesnych obiektów sakralnych w Polsce oraz na świecie.

2. Beton (żelbet) idealne tworzywo architektoniczne w kształtowaniu form obiektów architektury sakralnej

Beton po raz pierwszy odegrał rolę cennego torzywa architektonicznego w sztuce sakralnej na początku XX wieku. Szczególnym a zarazem przełomowym obiektem w postrzeganiu estetyki betonu stał się kościół Notre Dame du Raincy z 1922 roku. Projektant Auguste Perrot świadomie na obiekcie monumentalnym (nie jak dotychczas tylko w fabrykach czy halach) zastosował surowy beton, z pozostawionym starannie odciśniętym rysunkiem deskowania. Za sprawą ograniczonych środków finansowych przeznaczonych na realizację tego przedsięwzięcia, Perrot zrealizował pierwszy przykład „brut betonu” [1].

W przeciwieństwie do tradycyjnych rozwiązań formalnych Perrota, wzorowanych na doktrynach Viollet-le-Duca, francuski architekt Le Corbusier w swoich projektach i realizacjach zaprezentował w pełni brutalizm betonu – we współczesnej awangardowej formie. Na miarę nowych możliwości estetycznych betonu zaprojektował między innymi kościół Notre Dame-du-Haut w Ronchamp czy klasztor dominikanów La Tourette w Eveux. W realizacjach tych ukazał

jak beton (żelbet) zatracza swą sztywność i staje się strukturą organiczną.

Realizacje Le Corbusiera, prezentujące konsekwentną kontynuację estetyki betonu, stały się również źródłem inspiracji architektów – reprezentujących krakowską szkołę architektury – tworzących realizacje z jego zastosowaniem. Beton przestał być postrzegany jako tworzywo o cechach czysto utylitarnych, stał się środkiem wyrazu estetycznego do materializowania myśli architektonicznej [2]. Dariusz Kozłowski przypisał mu duszę: *Beton ma – duszę. To metaforyczne stwierdzenie przywołuje najpierw skojarzenie antropomorficzne – oglądając rzecz architektoniczną z betonu obcujemy z jej zewnętrznością, oglądamy jej „skórę”, by ocenić formę. Gdy refleksja lub dociekiliwość nakazuje wejrzeć w głąb, można zobaczyć moc materiału, siły przebiegające wewnątrz konstrukcji – czasem przybierające przeszukiwany jedynie układ, ukrytych tam, części stalowych. Niekiedy można ujrzeć duszę betonu – gdy kształt rzeczy ujawni to jedyne z możliwych połączeń – piękna, celowość, trwałość wyтворu ludzkiej wyobraźni* [3].

Surowe walory plastyczne betonu, tkwiące w jego naturze, Dariusz Kozłowski wykorzystał i wprowadził do zespołu sakralnego Centrum Zmartwychwstańców na Zakrzówku w Krakowie, zrealizowanego w stylistyce surrealistycznej (autorstwa Dariusza Kozłowskiego, Wacława Stefańskiego i Marii Misiągiewicz). Szczególnie widoczne staje się w architekturze budowli oraz jej wnętrzach wykorzystanie betonu, zarówno jako konstrukcji, jak i materiału wykończeniowego.

W kompleksie Zmartwychwstańców oprócz bogactwa detali i różnorodności materiałowej, ukazany został przeskalowany na całą elewację, rozdarty i poszarpany na krawędziach ogromny żelbetowy mur, akcentujący główne wejście do zespołu. Natomiast surowe betonowe fasady kościoła Emaus, wyróżnia iluzjonistyczny relief powtarzający rysunek „kaplicy z kopułą” [4]. Od strony ulicy Ks. Pawlickiego

oraz wejścia, zaprojektowano ogromnych rozmiarów "mur klasztorny" – w postaci potężnej żelbetowej arkady - otaczający budynek seminarium. Forma arkad, ma postać zrytmizowanych, powtarzalnych słupów i stanowi estetyczne ograniczenie – zamknięcie kompozycji od strony miasta.

Obiekty Centrum wzniesione zostały w technologii murowanej oraz żelbetowej, stropy żelbetowe wylewane na mokro, mury klasztoru – żelbetowe. W wykończeniu zewnętrznym wykorzystano walory surowego żelbetu [5]. We wnętrzach oprócz prostego tynku, wprowadzony został beton – na „sklepieniu” oraz pozostawiono niezakryte odlewy żelbetowe. Szczególną uwagę zwracają żelbetowe stropy (ze śladami deskowania) w kaplicach. Zawieszono na nich nic nie niosące „sklepienia”, o nieregularnych kształtach. We wnętrzu kaplicy domowej św. Józefa, nad ołtarzem zawieszono dominującą nad całym wnętrzem, ciężką nieregularną żelbetową bryłę, nazwaną „chmurą”. W bibliotece „Domu sióstr” zaprojektowano sklepienie, które zmieniło się w *zdekompowany negatyw powidoku przekrycia barokowej kaplicy* [6].

Idea komponowania przestrzeni z różnorodnością zastosowanych faktur oraz kontekstem betonu z innymi materiałami, współtworzą nastrój przestrzeni sakralnej i pozwalają na określenie jej jako poezji, zaś jej twórcę stawiają wysoko wśród poetów betonu [7] (Fot. 1- 6).

Przykładem i dziełem przełomowym, nie tylko na terenie Archidiecezji Krakowskiej, ale i w skali całego kraju, realizującym w rozwiązaniach funkcjonalnych postanowienia soborowe, jest kościół „Arka Pana” w Nowej Hucie, autorstwa Wojciecha Pietrzynka [8]. Ze względu na zastosowane materiały (beton, żelbet, oraz stal i szkło), ukształtowanie bryły architektonicznej, estetykę form, wykorzystanie nowych technologii, których zastosowanie umożliwiło powstanie obiektu jednoprzestrzennego, jest on pierwszym nowoczesnym posoborowym obiektem sakralnym kościoła krakowskiego oraz kościoła w Polsce.

Obiekt wybudowany został w systemie przenikających się łupin żelbetowych. Wysoki krzyż wykonany ze stali nierdzewnej, jest głównym elementem konstrukcyjnym budowli, wspiera betonowe ściany oraz utrzymuje składającą się z osiemnastu stalowych przęseł konstrukcję obiektu. Ściany zbudowane są z żelbetu i szkła. Zewnętrzne ściany betonowe obłożone są szarym kamieniem. Od wnętrza ściany te pochyłają się lekko ku środkowi. Prosta i logiczna konstrukcja obiektu stała się wsparciem dla koncepcji architektonicznej oraz ukształtowania jej formy [9].

Kościół swoją formą odbiega od dotychczasowych prostopadłościennych obiektów sakralnych, dlatego jego realizacja była niezwykle skomplikowana. Proces ten opisał T. Przemysław Szafer następująco: *autor i realizator kościoła (...), oparł całą dokumentację projektową na zapisie powstały z odwzorowywania z modelu poszczególnych punktów systemem współrzędnych*.

Podstawową dokumentacją stał się w tym wypadku nie plik rysunków, a zestaw kilkudziesięciu tysięcy trzyczynowych liczb. Wyznaczenie ich na budowie następowało za pomocą prostej podziałki metrowej i pionu, które okazały się tu wystarczająco dokładnymi instrumentami [10].

Bryła kościoła jest nieregularna i ekspresyjna. Składają się na nią rzeźbiarskie, miękkie oraz płynne formy, jak: od strony wschodniej wysoka i sięgająca ponad dach betonowa ściana, natomiast od zachodu - dynamicznie oderwana od ziemi „sciana żaglowa”, przypominające kształtem arkę. Obiekt oprócz bogactwa form cechuje różnorodność materiałowa i bogactwo detali, występujących zarówno na zewnętrz jak i w wystroju wewnętrznym świątyni. Ciekawie i bardzo starannie projektant rozwiązał połączenia występującego we wnętrzu świątyni betonu ze szkłem i drewnem. Jedno z architektonicznych rozwiązań – to połączenie drewna w postaci gontu na suficie z betonem ściany – za pomocą stali; inne: drewno, szkło i beton – na styku „dna arki” [11]. Wymowna architektura obiektu, wielka różnorodność kształtów, zadziwiają nowatorskimi formami oraz rozwiązaniami konstrukcyjnymi. Zarówno rozwiązania formalne, organizacja przestrzeni, jak i sposób wznoszenia tej świątyni, stały się modelowe dla powstających po 1980 roku kościołów (fot. 7–10).

W konstrukcji żelbetowej, wylewanej z równomiernie i konsekwentnie odciśniętym deskowanym szalunkiem, surową fakturą betonu, stanowiącą ascetyczną dekorację ścian zewnętrznych oraz wnętrza - zrealizowany został kościół św. Królowej Jadwigi na Krowodrzy w Krakowie, projektu Romualda Loeglera i Jacka Czekaja, zaliczany do nurtu dojrzałego, późnego modernizmu. Główna bryła obiektu zbudowana została z czystych geometrycznych form żelbetowych, jako zdekonstruowany sześcian. Całość założenia projektanci oddali regułom geometrii. Autor projektu, Romuald Loegler, proces powstawania architektury obiektu opisał następująco: (...) *Ukształtowanie architektoniczne bryły kościoła oparto o założenie, że architektura jest współzależna od konstrukcji, której rzeźbiarsko ukształtowane elementy*

stanowią o jej charakterze, detalu i są wykładnikiem estetycznych wartości [12].

Obiekt w całości wykonany został w konstrukcji żelbetowej. Płaszczyzny betonu niosą wymiar symboliczny. Surowe wnętrze charakteryzuje ascetyzm oraz brak zbędnych ozdób i detali. Dominuje w nim głównie szara tonacja betonowych ścian, która nadaje obiekowi niezwykle monumentalny charakter oraz tworzy nieco chłodny, ale emocjonalny nastój (fot. 11–14).

3. Podsumowanie

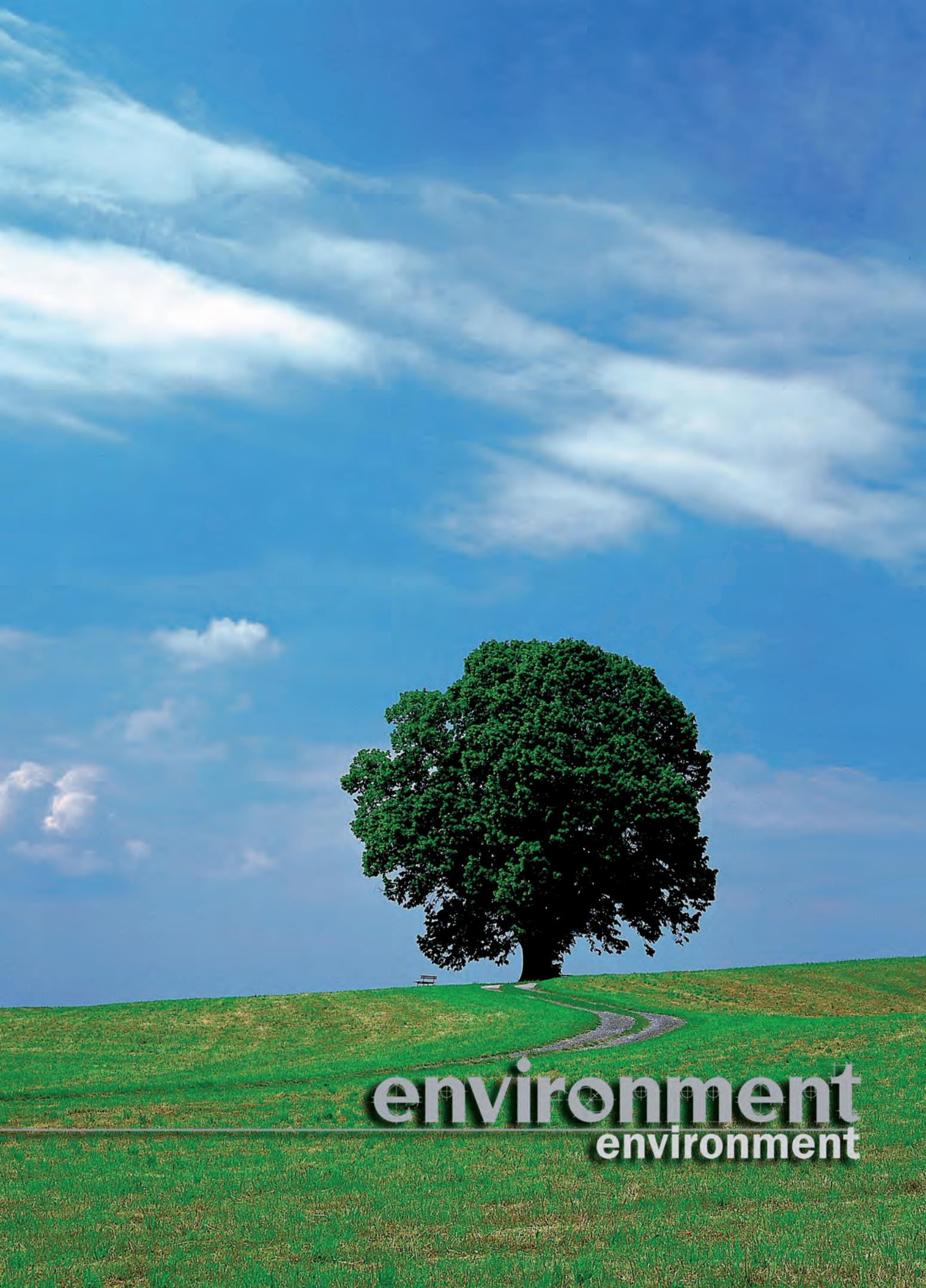
W architekturze kościołów projektowanych i realizowanych w naszym kraju, po roku 1970 wykorzystanie materiału budowlanego jakim był żelbet, wpłynęło znacząco na formę współczesnych świątyń – zwiększać ich skalę oraz zakres swobody w kształtowaniu architektonicznym. Żelbet jako materiał konstrukcyjny stworzył ogromne możliwości realizacyjne współczesnej myśli architektonicznej. Umożliwił pokonanie coraz większych rozpiętości i wysokości. Zadecydował o nieograniczonych możliwościach dowolnego formowania brył. W znacznym stopniu wpłynął na rozwijania przestrzenne wnętrz – umożliwiając wykonanie przekryć o dużych rozpiętościach i nadając wrażenie jednolitości przestrzeni [13].

Surowy beton (żelbet) odgrywa również duże znaczenie w wyrazie plastycznym realizacji sakralnych. Zastosowanie naturalnych odcisków szalunków i desek, bez wygładzania śladów niedoskonałości i przypadkowych pozostałości wykonawstwa, ożywiło powierzchnię betonu i nadało jej oryginalnych wartości. Beton stał się więc idealnym tworzywem architektonicznym we współczesnej architekturze sakralnej, posiadającym wysokie cechy i walory estetyczne.

Materiał ten pod względem zarówno fizycznym, jak i natury metaforycznej, pozostaje uniwersalnym tworzywem architektonicznym. Nowoczesne technologie, nieograniczone możliwości konstrukcyjne, rozwiązania materiałowe i ich dostępność umożliwiały niezwykle elastyczne zdolności jego obróbki, tworzenie nieograniczonych układów konstrukcyjnych w zakresie brył i dyspozycji wnętrz.

Konkludując, można zatrzymać się przy słowach Marii Misiągiewicz, która napisała że *od talentu twórcy zależy czy powstanie zeń rzecz zwyczajna, dzieło niecodzienne, czy też dzieło nieśmiertelne* [14].

Dyskusja nad architekturą betonową trwa nadal. Świadczy o tym sfera wydarzeń architektonicznych, w tym cykl corocznej edycji Ogólnopolskiego Konkursu Architektura Betonowa.



environment
environment

JOZEF JANDAČKA
University of Zilina, Slovakia
jozef.jandacka@fstroj.uniza.sk

ANDREJ KAPJOR
University of Zilina, Slovakia
andrej.kapvor@fstroj.uniza.sk

MILAN MALCHO
University of Zilina, Slovakia
milan.malcho@fstroj.uniza.sk

ŁUKASZ J. ORMAN
Kielce University of Technology, Poland
orman@tu.kielce.pl

SELECTED SCIENTIFIC AND ENGINEERING APPLICATIONS OF INFRARED TECHNOLOGY

Abstract

The paper presents applications of infrared measurements. It discusses the use of thermovision in the analysis of heat losses in buildings, environmental monitoring, scientific research in thermal fields on different surfaces and other. Examples of the infrared measurements are given and discussed in the text.

Keywords: heat losses, infrared measurements, visualizations

1. Introduction

Infrared technology used to be an expensive testing method, however, nowadays even small companies can afford to purchase simple thermovision cameras. Their widespread use ranges from heat losses detection in buildings (which is quite common due to the thermal performance analysis) to complex scientific measurements.

The fundamental basis of the infrared testing is the detection of radiation, whose intensity in the simplest form can be calculated according to the Stefan-Bolzmann law. This radiation is emitted by every body of temperature exceeding 0 K and depends on the temperature of the analysed element to the forth order, emissivity (taking values from 0 to 1) and the Stefan-Boltzmann's constant ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$). In real measurement conditions the detector receives radiation emitted from other sources too and not only from the observed element. As a consequence, correct determination of temperature requires taking into account radiation reflected from the object and coming from sources in the surroundings as well as atmospheric radiation. It is done by the software of an

infrared camera when data such as temperature of the surround objects, atmosphere, air humidity and etc. are input to the device.

Literature provides many examples of the application of infrared technology. In [1] the detection of warmer and colder areas of the urban areas is discussed with the view to provide knowledge for proper urban planning. Determination of the temperature of the earth itself is also vital and can be investigated with thermovision [2]. This temperature is a crucial parameter in environmental assessment of e.g. plant vegetation, energy balance, soil humidity and etc. Similarly, measurements of this kind can be performed for the sea surface [3]. In this case the temperature distribution can help to detect anomalies of anthropogenic origin in the analysed areas or obtaining knowledge on climatic conditions. Data collected for many years can enable to create trends of climate changes. Apart from earth, the atmosphere can also monitored with infrared technique. For example water vapour, carbon oxide or ozone particles might be observed with this method [4]. The composition of the atmosphere can be determined

with devices located in satellites. In [5] three possible applications have been discussed, namely: local ozone concentration measurements, carbon oxide monitoring and early detection of sulphur dioxide from volcanic emissions.

Thermovision can be applied in the analysis of biochemical activities on landfill sites. In [6] the test results for the landfill located in Ostrowiec Świętokrzyski were presented. Different temperatures were recorded for fresh waste (characterised by higher temperatures due to intense biodegradation processes) and older – of much lower temperature. The speed of the monitoring process and the possibility of analysis large areas were also pointed out.

Chimneys with exhaust products of combustion are the sources of air pollution. Gaseous and particulate contaminants are emitted from them and the knowledge of the spread of air pollution is crucial. In [7] the impact of the technical condition of a cement plant chimney on the spread of air contaminants with regard to its thermal insulation was analysed. Thermal imaging of the chimney was used to assess the influence of the reduction of the exhaust gases temperature (caused by improper thermal insulation and elevated heat losses to the surroundings) on the propagation of contaminants in the atmosphere.

Currently, energy saving initiatives are more and more common. On the one hand it is related to environmental protection and emissions of carbon dioxide and other contaminants, while on the other to economics due to reduced costs for heating of well insulated buildings. In this regard infrared technology can help in the assessment of thermal insulation of walls and other elements in buildings. The features of thermovision measurements and their applications for buildings were described in [8]. In [9] and [10] the issue of infrared analysis of buildings was also considered with the focus on heat losses from old multi – flat residential buildings where a thermovision camera can be very efficient in the detection of thermal bridges that usually occur at the junctions of the reinforced-concrete plates.

The use of thermovision is naturally much wider. For example it covers medical applications. With regard to sports medicine and rehabilitation, infrared technique can help to determine the level of exhaustion and assessment of rehabilitation effectiveness. Colder areas due to long – term contraction of the muscle, whose blood vessels are contracted, might be detected with a thermovision camera. The situation is similar in case of spinal curvature, in which colder

areas are located opposite the curvature [11]. Infrared imaging can also be applied in knee joints illnesses [12]. While dental use of this technique may cover, among others, analyses of temperature changes at polymerization of composites thorough measuring infrared emissions from surfaces of resin composite restoration during photocuring [13].

This overview of the uses of thermovision is naturally not complete since many more applications are possible. In the following chapter of this paper selected uses of this technique will be discussed and examples of the authors' research will be given.

2. Examples of the measurements

2.1. Thermal losses analysis in buildings

At the beginning of an overview of the example applications of infrared measurements it is worth noting that practical experience of the user of a thermovision system and knowledge of the measurement errors are crucial to properly conclude about the obtained results. Producing an infrared image itself is easy, however, its interpretation might be challenging, at times. For instance, the radiation can be reflected from surrounding sources and influence the temperature reading of the analysed surface, as presented in Figure 1. Here, the surface on the left hand side "seems" to have warmer areas, while it is just a reflection phenomena of radiation coming from the radiator. This reflective surface is a door covered with white metal layer.

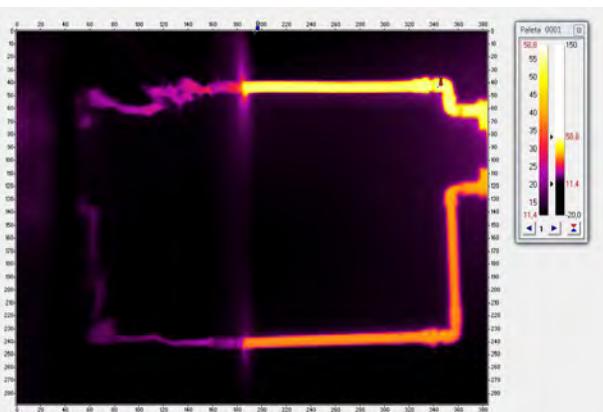


Fig. 1. Reflection phenomenon on the reflective surface

Buildings themselves consume significant amounts of energy – both in the winter when heating is needed and in the summer if they are air conditioned. This consumption can be reduced, for example through better insulation. As a result, maintenance costs might be lower, which has both environmental and ecological benefits.

Thermal imaging can be used in this case to analyse areas of increased heat losses during the winter time. Figure 2 presents the thermal map of a modern multi-flat building where areas of elevated heat losses are presented in red, pink and yellow colours.



Fig. 2. Thermograph of the multi-flat building

Particularly hot might be chimneys (Fig. 3). Their improper thermal insulation results in the reduction in temperature of the exhaust gases due to heat losses, which might effect the special propagation of air pollutants in the atmosphere, as discussed in [7].

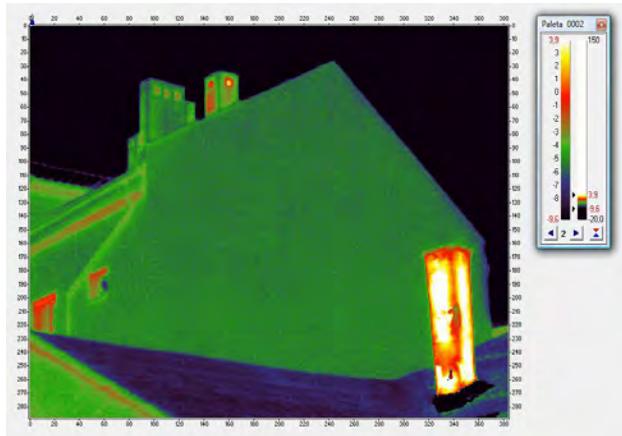


Fig. 3. Thermograph of the modern multi-flat building with the chimney

Within the building structure some elements are more prone to heat losses for example balconies. They might act as fins of a heat exchanger and promote heat losses. In this case a temperature gradient occurs along their length as presented in Figures 4a and 4b, which shows temperature changes along line L1 on the analysed element in the analysed multi-flat building. It is worth noting that proper construction of balconies can help to avoid the occurrence of this unfavourable phenomenon.

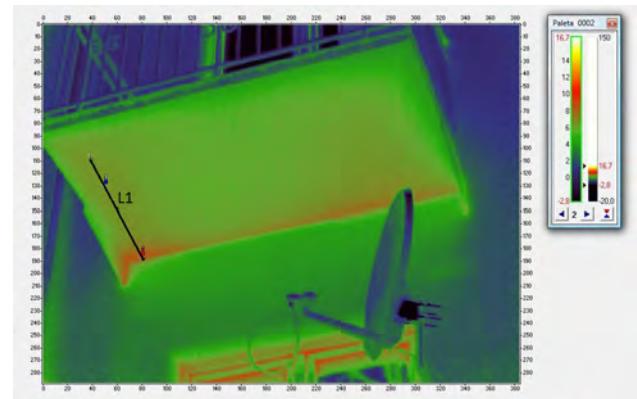


Fig. 4a. Thermograph of the balcony

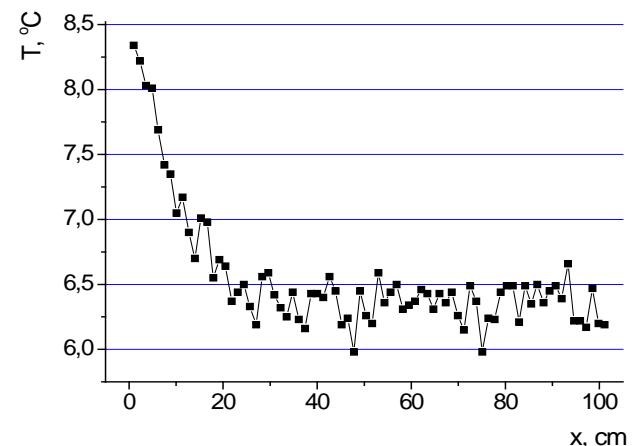


Fig. 4b. Temperature changes along line L1

Heat losses can occur at different locations within the building. Figure 5a presents a thermograph of the old multi-flat building. In this case elevated losses can be observed along line L2. Here pipes of the central heating system might run within the building and this area proves to have higher surface temperatures. Figure 5b presents the temperature changes for the analyses line.

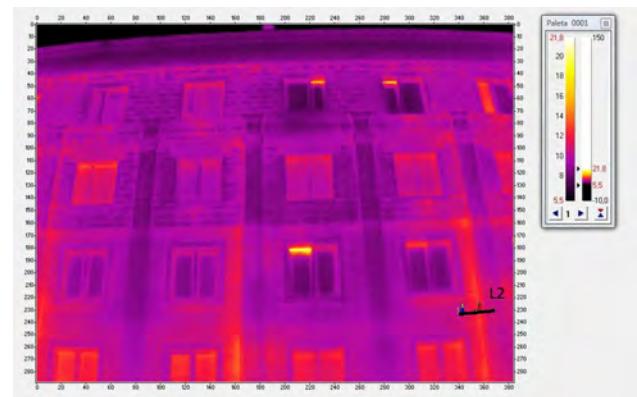


Fig. 5a. Thermograph of the multi-flat building

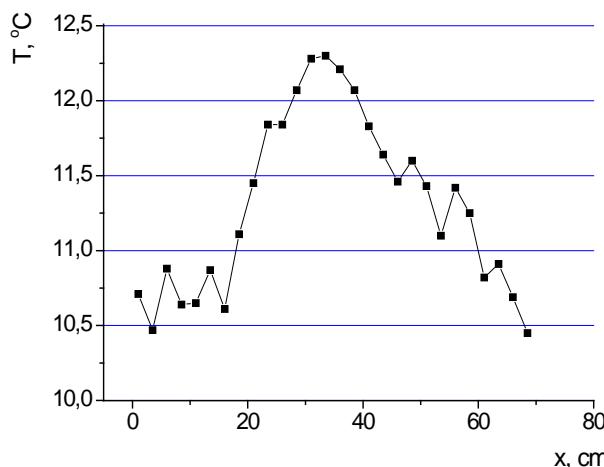


Fig. 5b. Temperature changes along line L2

Apart from thermal bridges the infrared technique can be useful in the detection of humid areas in the building as well as determination of leakage spots in pipes transporting warm liquids.

2.2. An analysis and visualization of heating systems streaming by the help of thermovision

To know the mechanism of the heat transfer from the floor convector to the surrounding atmosphere through the natural convection, it is necessary to know the shape of the streaming and the temperature distribution in the direct closeness to the surface. Many visualization methods exist to visualize density changes close to the surface of the body with the heat transfer, starting from the shadow method, orifice method to interferometric or holographic methods. To visualize natural air streaming it is also possible to use the methods with marking the streaming for example by helium bubbles or by temperature marks. But this method is not suitable to visualize the streaming from the floor convector as the measurements were made in the thermostatic chamber where it is not suitable to install other necessary devices (a lamp, a compressor) with high heat output.

In this case the thermovision was used to visualize the heat output from the convector. It is known that by the help of the thermovision it is possible to visualize also small temperature differences. But the object must not be diathermal and the emission coefficient

of its surface should be close to 0.9 because the air close to the surface of the floor convector heated through the natural convection is also diathermal and so it is invisible on the infra screenshots. From this reason the method of the heating of a thin, most often paper, foil was used for the visualization. The foil was placed at the surface so that the orientation of its surface was along the air streaming and so that it does not influence the natural convection. The foil is heated by the streaming warm air on temperatures close to the streaming air and the temperature profile in the closeness of the object is properly visible as well as quantifiable. The way of placing the foil for the visualization in the thermostatic chamber is shown at Figure 6. On various screenshots the visualized area of natural convection is shown. The infracam MIDAS 320L was used and the pictures were evaluated by the help of the Pyrosoft software.



Fig. 6. Floor convector in the thermostatic chamber

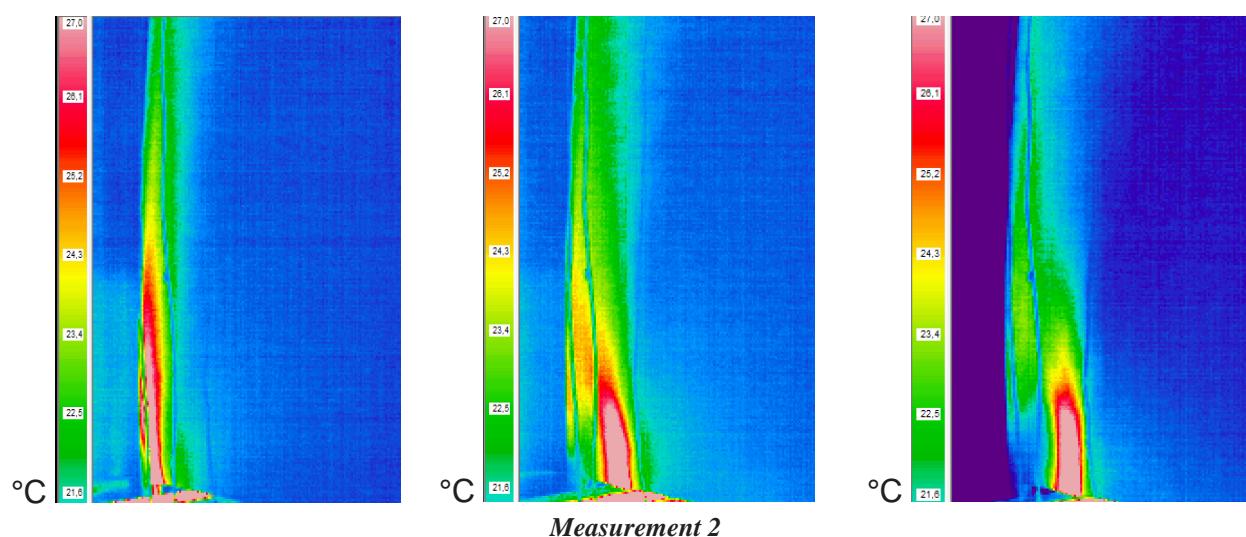
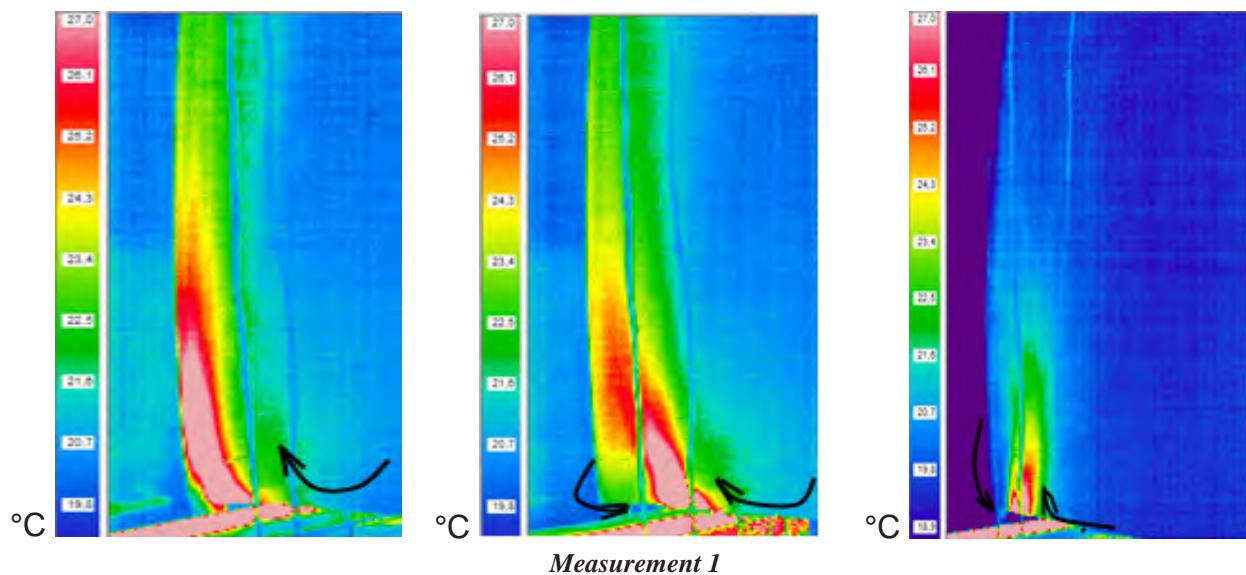
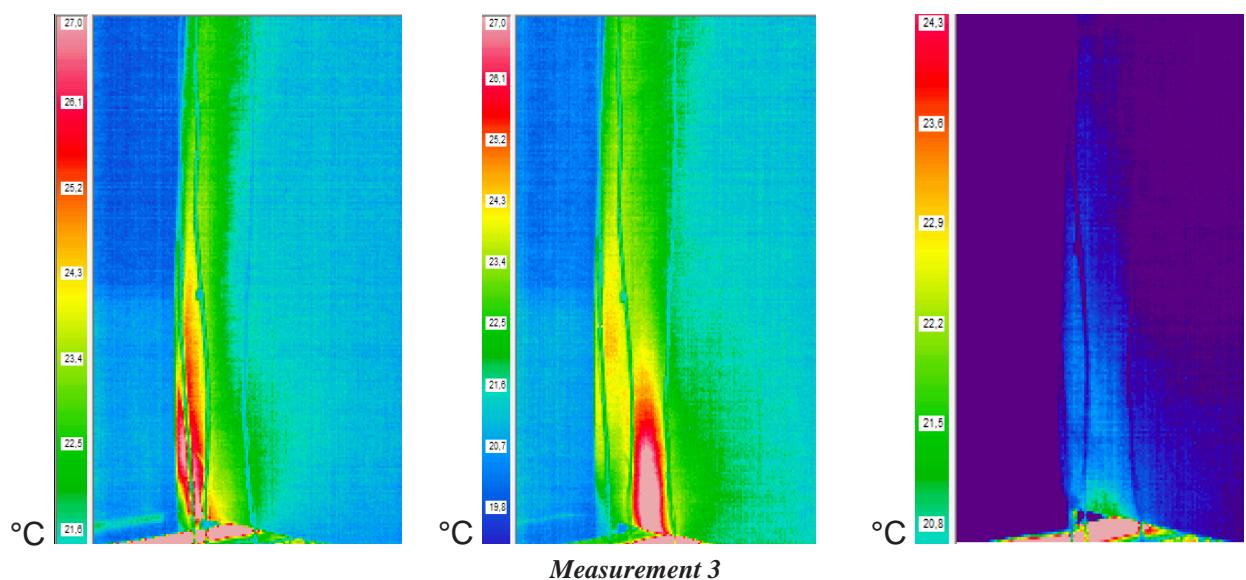


Fig. 7. Visualization of temperature fields: measurement 1 and 2



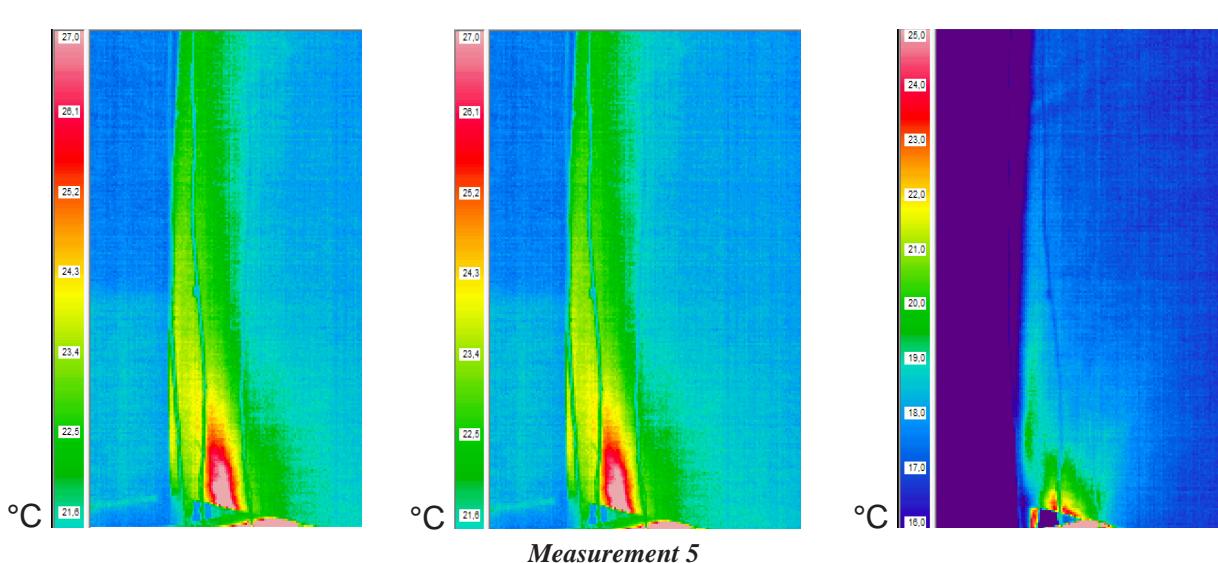
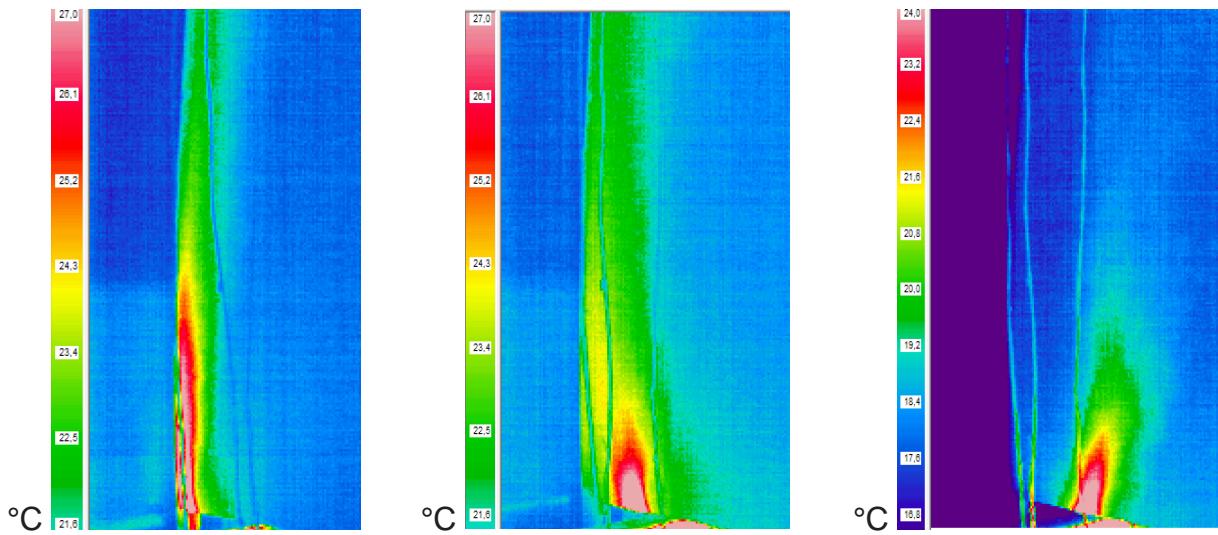


Fig. 8. Visualization of temperature fields measurement 3, 4 and 5

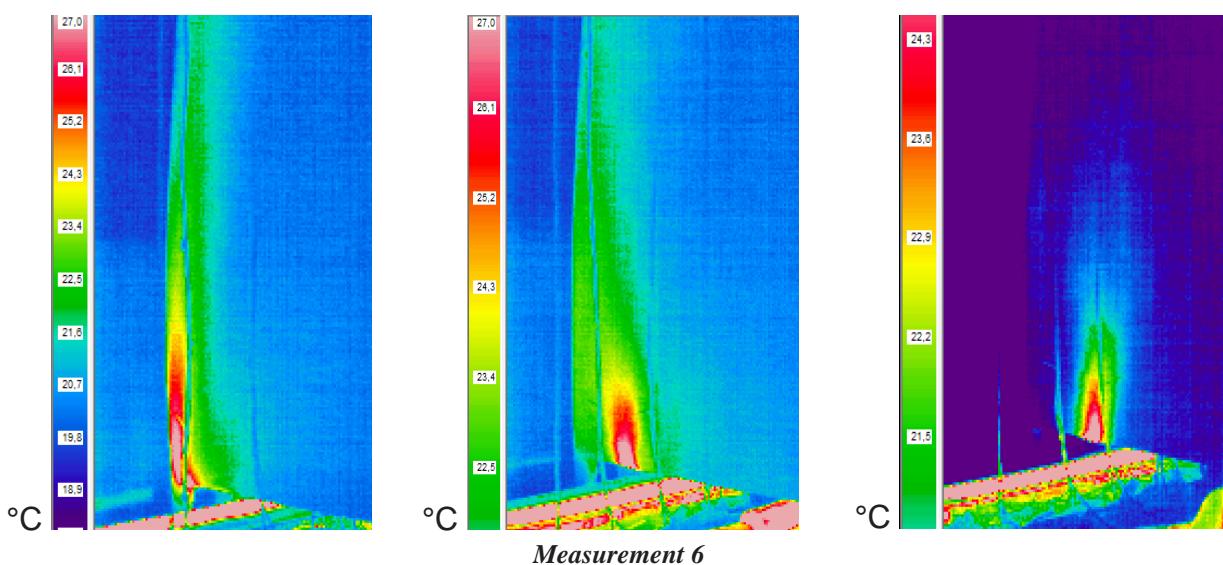


Fig. 9. Visualization of temperature fields measurement 1 and 6

From the visualization of temperature fields from the measurement 1–6 in the thermostatic chamber, temperature fields at three different measured states are visible (a – convector at the wall, b – convector from the wall, c – cold front wall). From following pictures it is evident, that with the increasing output also the stream reach increases. From the pictures of temperature fields it is possible to define also the picture and a direction of the air streaming in the thermostatic chamber. When the floor convector is placed close to the wall, the colder air is being sucked from the area of the chamber and the warmed air streams along the front wall. When the floor convector in the tube was placed farther from the wall (Figures 7b–9b) it is visible that the air stream from the convector sucks cold air from the wall which causes its mild shift. Finally, it sticks to the wall with smaller distance. At experimental measurements of floor convectors in the thermostatic chamber there was also visualized a state where the front wall of the convector was cooled by the maximum output of the cooler and the other walls were switched off, Figure 7c – 9c. From these visualizations it is evident that cold air falls along the front wall and it presses warmed air from the convector in the direction into the room. Furthermore, it is evident that the higher the convector output is, the smaller is the shift. At the measurement 2 Figure 7c, where the floor convector with the highest output was measured, it is visible that even when the front wall is undercooled the air stream from the floor convector mildly sticks to the wall and warms it.

3. Conclusions

Infrared measurements are more and more common in the industry and science. The availability of thermovision systems due to their lower prices has enabled broader use of this technology. Possible applications range from heat losses analysis in buildings, heating systems, medical testing, environmental monitoring and many other. Because of such widespread scope of uses the infrared technology will undoubtedly be even more commonly used in the future.

References

- [1] Hartz D.A., Prashad L., Hedquist B.C., Golden J., Brazel A.J.: *Linking satellite images and hand-held infrared thermography to observed neighborhood climate conditions*, Remote Sensing of Environment 104 (2006), pp. 190 – 200.
- [2] Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Zarco-Tejada P.J., Sepulcre-Cantó G., de Miguel E.: *Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data*, Remote Sensing of Environment 102 (2006), pp. 99–115.
- [3] Fisher J.I., Mustard J.F.: *High spatial resolution sea surface climatology from Landsat thermal infrared data*, Remote Sensing of Environment 90 (2004), pp. 293–307.
- [4] Clerbaux C., Gilles J., Edwards D.: *New Directions: Infrared measurements of atmospheric pollution from space*, Atmospheric Environment 38 (2004), pp. 4599 – 4601.
- [5] Clerbaux C., Turquety S., Coheur P.: *Infrared remote sensing of atmospheric composition and air quality: Towards operational applications*, C. R. Geoscience 342 (2010), pp. 349–356.
- [6] Żygadło M., Orzechowski T., Latosińska J.: *Monitorowanie przemian biotermicznych w składowiskach odpadów techniką termowizyjną*, Proc. of IV Conf „Termografia i termometria w podczerwieni”, Łódź, pp. 120–125, 2000.
- [7] Orzechowski T., Orman Ł.J.: *Thermovision inspection of air polluting emitters*, Pollution Engineering, vol. 38, 7 (2006), pp. 22–25.
- [8] Jaworski J.: *Termografia budynków. Wykorzystanie obrazów termalnych w diagnostyce budynków*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2000.
- [9] Orman Ł.J.: *Badania termowizyjne w ocenie termoizolacyjności budynków*, Instal 4A (2009), pp. 19–23.
- [10] Orman Ł.J., Sułek M.: *Diagnostyka metodą termografii w podczerwieni w ocenie termoizolacyjności i charakterystyki energetycznej*, Proc. of Conf. Terotechnology 2009, pp. 325–330.
- [11] Mandura H. (editor), *Pomiary termowizyjne w praktyce*, Agencja Wydawnicza PAKU, Warszawa, 2004.
- [12] Rusch D., Follmann M., Boss B., Neeck G.: *Dynamic thermography of the knee joints in rheumatoid arthritis (RA) in the course of the first therapy of the patient with methylprednisolone*, Z Rheumatol 59, Suppl 2, II/131–II/135, 2000.
- [13] Hussey D.L., Biagioli P.A., Lamey P.J., *Thermographic measurement of temperature change during resin composite polymerization in vivo*, Journal of Dentistry, vol. 23, 5 (1995), pp. 267–271.

Acknowledgement

The research is supported by European regional development fund and Slovak state budget by the project "Research centre of University of Žilina", ITMS 26220220183.

Jozef Jandačka
Andrej Kapor
Milan Malcho
Łukasz J. Orman

Wybrane naukowe i inżynierskie zastosowania techniki termowizyjnej

1. Wstęp

Technika termowizyjna do niedawna była jeszcze bardzo kosztowna, jednak dziś nawet niewielkie firmy mogą pozwolić sobie na zakup systemów termowizyjnych. Ich zastosowanie jest szerokie – od dość prostej detekcji mostków cieplnych w budynkach po skomplikowane badania naukowe. Pomiary opierają się o detekcję promieniowania, które jest emitowane przez obserwowane ciało. Na podstawie prawa Stefana-Bolzmanna możliwe jest wyznaczenie temperatury analizowanego elementu. Istotnym czynnikiem jest właściwe określenie współczynnika emisji – przyjmującego wartości od 0 do 1 – i wprowadzanego do oprogramowania kamery.

Literatura zawiera szereg przykładów wykorzystania pomiarów w podczerwieni. W [1] analizowano detekcję obszarów w wyższej i niższej temperaturze do celów urbanistycznych, a w [2] w pomiarach temperatury powierzchni ziemi w zagadnieniach środowiskowych. Podobnie w [3] rozpatrywano pomiary temperatury powierzchni morskich. Innym zastosowaniem jest monitoring stężenia pary wodnej, tlenku węgla czy ozonu w atmosferze [4]. Podobnie w [5] rozpatrywano wykorzystanie techniki termowizyjnej do pomiarów lokalnego stężenia ozonu, monitoringu tlenku węgla czy wczesnego wykrywania emisji dwutlenku węgla ze źródeł wulkanicznych.

Termowizję można też wykorzystywać w pomiarach aktywności biochemicalnej składowisk odpadów [6] czy w analizie wpływu stanu technicznego kominów na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń [7]. Szerokie jej zastosowanie wiąże się z detekcją obszarów o podwyższonych stratach ciepła w budynkach, co opisano w [8–10]. Pomiary w podczerwieni można również wykorzystywać w medycynie. Temu zagadnieniu poświęcono np. następujące publikacje [11–13].

Powyższy przegląd nie wyczerpuje szerokiego spektrum zastosowania pomiarów w podczerwieni. W kolejnym rozdziale autorzy opiszą własne przykłady wykorzystania termowizji.

2. Przykłady pomiarów

2.1. Analiza strat ciepła w budynkach

Przed przystąpieniem do analizy przykładów zastosowania termowizji warto zwrócić uwagę na konieczność posiadania odpowiedniej wiedzy i doświadczenia przez osoby obsługujące kamery. Jest to związane z możliwymi trudnościami, związanymi z analizą obrazu. Na przykład powierzchnia na rysunku 1 wydaje się być cieplejsza, natomiast jest to związane jedynie ze zjawiskiem odbicia promieniowania od drzwi pokrytych blachą.

Budynki konsumują znaczną ilość energii – w zimie na cele grzewcze, a w lecie, jeśli występuje chłodzenie powietrza. Ograniczenie strat ciepła może wpływać na znaczne zmniejszenie ilości pobieranej energii. W tym zagadnieniu może być przydatna technika termowizyjna.

Rysunek 2 przedstawia termogram nowoczesnego budynku wielorodzinnego z obszarami o podwyższonej temperaturze uwidocznionych w kolorze czerwonym, różowym i żółtym. Kominy mogą mieć znaczną temperaturę (rys. 3), a spadek temperatury spalin może wpływać na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń, co poddano dyskusji w [7].

Niektóre elementy budynku mogą stanowić źródło zwiększych strat ciepła. Są to na przykład balkony. W tym przypadku mogą one działać jak zebra czyli wymienniki ciepła. Wówczas na długości pojawia się gradient temperatury, co zilustrowano na rysunku 4a i 4b. Rysunek 5 przedstawia termogram innego budynku. W tym przypadku obszar o podwyższonej temperaturze może odnosić się do niezaizolowanego termicznie pionu instalacji c.o. Termowizja może także służyć do detekcji obszarów zawiigoconych czy wykrywania nieszczelności w przewodach transportujących czynnik o podwyższonej temperaturze.

2.2. Analiza i wizualizacja efektu działania elementu grzewczego przy pomocy termowizji

Wiedza na temat mechanizmu wymiany ciepła z konwektora podłogowego do powietrza w po-

mieszczeniu poprzez konwekcję swobodną wymaga znajomości kształtu strugi i rozkładu temperatury w bezpośredniej bliskości powierzchni. W warunkach prac prowadzonych w komorze termostatycznej do badań wymiany ciepła z konwektora wykorzystano pomiary termowizyjne. Obserwowano powierzchnię umiejscowioną wzdłuż strumienia powietrza tak, aby nie zaburzała ona konwekacji naturalnej (rys. 6). Ciepłe powietrze ogrzewało obserwowany element, a rozkład temperatury mierzono kamerą termowizyjną MIDAS 320L. Uzyskane obrazy analizowano oprogramowaniem Pyrosoft. Na podstawie uzyskanych rozkładów temperatury dla różnych lokalizacji konwektora można było wnioskować o przepływie strumienia cieplego powietrza z badanego elementu grzejnego.

3. Wnioski

Pomiary termowizyjne stają się coraz powszechniejsze zarówno w przemyśle jak i nauce. Dostępność systemów do badań w podczerwieni związana z niższymi cenami umożliwia ich szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach np. do analizy strat ciepła w budynkach, pomiarów elementów systemów grzewczych, monitoringu środowiska i innych. W związku z tak szerokim spektrum aplikacji termowizji metoda ta będzie bez wątpienia stawać się coraz powszechniejsza.

MARTIN VANTÚCH¹

ANDREJ KAPJOR²

MILAN MALCHO³

JOZEF HUŽVÁR⁴

ŠTEFAN PAPUČÍK⁵

University of Žilina, Slovakia

¹ martin.vantuch@fstroj.uniza.sk

² andrej.kapjor@fstroj.uniza.sk

³ milan.malcho@fstroj.uniza.sk

⁴ jozef.huzvar@ fstroj.uniza.sk

⁵ stefan.papucik@ fstroj.uniza.sk

OPERATIONAL MEASUREMENT OF GROUND/WATER HEAT PUMP IN COLD WEATHER

Abstract

Article discusses the changes in heat flows in the secondary and primary circulation ground/water heat pump to low ambient temperature environments in winter. These results are compared with various HP power parameters. At the same time it describes the changes in the thermal potential at the initial start-up HP.

Keywords: heat pump

1. Introduction

The term low-potential heat of the Earth means the heat flow from the ground in the Earth's crust with a relatively low potential. This flow can be divided into two basic groups:

- heat flux of solar radiation incident on the surface of the Earth,
- radiogenic heat flow from Earth's interior.

The heat incident on the surface of the Earth by the action of solar radiation is very unstable and affects heat flux to the surface to a depth of 10–20 meters (neutral zone). Seasonal and daily changes in the intensity of solar radiation and outside air temperatures cause temperature fluctuations of the surface layers of the Earth. Heat mode ground located at greater depth than the depth of the neutral zone is formed effect of thermal properties of the Earth's core. Heat flow from Earth's interior is stable and virtually no influence of any factor, whether seasonal or other changes in weather and temperature. The temperature of the earth increases with depth by geothermal gradient (about 3°C per 100 m). Size of radiogenic heat flow from Earth's interior for different areas is different. For Central Europe this size is approximately 0.05 to 0.12 Wm⁻².

To obtain low-potential heat from ground it is most common to use the type of heat pump ground

/water resp. water/ water, if we use for obtaining groundwater heat the ground mass. Operating conditions and performance parameters of heat pumps affect some factors related to thermophysical properties of heat transfer agents, weather conditions, ground mass structure etc. These factors can greatly affect performance of heat pumps, resp. heating water temperature on secondary side of the heat pump. In our case we have considered the influence of low ambient temperatures in winter, the heat pump itself.

1.1. COP HP

When heat is taken from the ground, it leads to cooling and reduction potential. With the gradual drawing heat from the earth ground first a significant decrease in performance due to cooling agents in the evaporator and temperature drop in circulation medium heat in an earth probe occur. Guiding performance data for the heat pump coefficient of performance COP is defined as a proportion of heat output and heat output from pumped low-potential heat source.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_v}{P_k} \quad (1)$$

where: P_k is input power,

\dot{Q}_v is heat performance, W .

The equation means that the heat pump COP proportionally affects heat output and associated power drawn from the earth, because later the power of heat pump was constant. The value of the heating power is determined by factors mentioned in the introduction. To achieve high COP values high temperatures in the evaporator, resp. low temperatures in the secondary circuit of the heat pump condenser must be achieved.

2. Experimental device for measuring HP

Measurement of the heat pump type ground/water was carried out 25 days in a forced circulation heat transfer working fluid in the primary circuit. Variables that affect performance of acquired land for the primary and secondary circuit heat pump have been observed. Temperatures were also recorded in the ground along the borehole (Fig. 1).

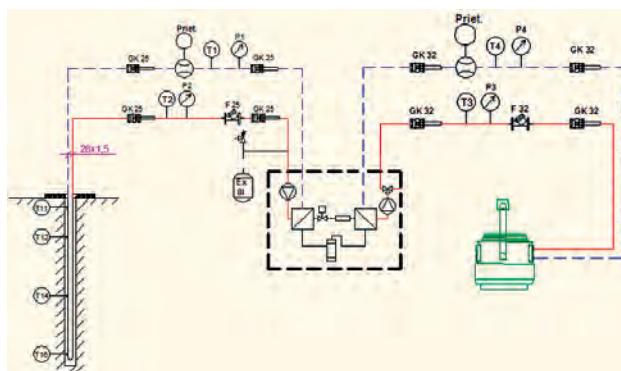


Fig. 1. Involvement of a primary and secondary circuit and measuring the heat pump components

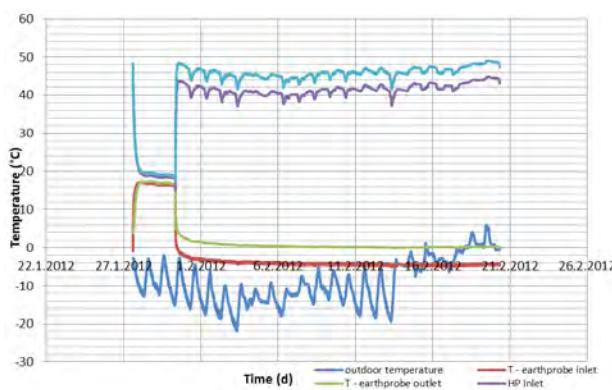


Fig. 2. The course of temperature changes working substance of the primary and secondary circuit HP

During the first two days only a circulation pump was in operation. Temperatures in the borehole slowly stabilized as temperature of the working substance. Temperature range of substances has stabilized at a value between 16.5 to 17°C. Temperatures at different depths, the well stabilized at values of 11.7°C in 150

meters depth, 10.8°C at 100 and 40 meters deep and 5.3°C at five meters.

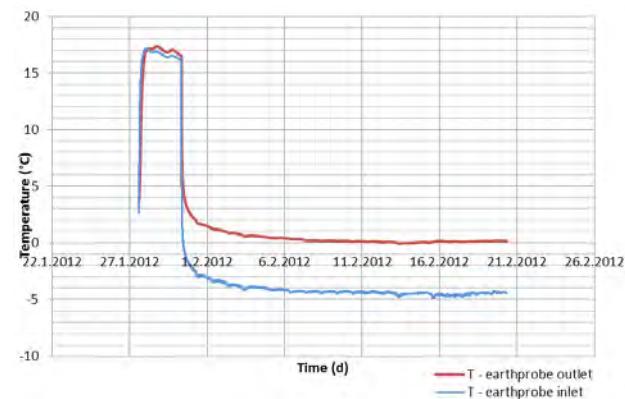


Fig. 3. Temperatures of working substance of primary circuit of entry and exit into the borehole

In the middle of the third day start heat pump and its onset can be observed for changes in temperature. After a full-on heat pump performance, we have seen increased short-term performance of heat pumps as a result of higher initial potential of accumulated heat of the earth. Over time, the pump performance measurement has stabilized at a constant value of about 8 kW, as indicated by the manufacturer. Temperatures at all depths gradually decreased and it was recorded as a reduction potential of water temperature on secondary circuit. Due to low ambient temperature overnight to reduce the temperature of heating water returns to the secondary circuit HP. There were even more marked hypothermia working substance at the inlet and the outlet of primary circuit heat pump and a slight increase in heat output obtained from the ground. Improved performance on the primary side just caused for the low temperature heat pump condenser (due to low night temperatures dropping and the temperature in the heated room, and thus to an increase in heat loss of the building). The refrigerant in condenser is cooled to a lower temperature than usual, which resulted in an increase in heat flow evaporation of refrigerant in evaporator heat pump.

On the other days there were significant variations in temperature. These fluctuations cause changes in temperatures of working substance in the primary and secondary side (Fig. 2). In the last phase of measurements there was a significant warming in weather which resulted in a slight stabilization of working substance of primary circuit and rise of working substance secondary circuit HP. During the measurement there was a slight descent working temperatures of substances on the primary and

secondary circuits. This was caused by pumping heat from the ground and reducing potential temperature in the immediate vicinity of borehole. On subsequent days, the low-potential heat flow stabilized at a constant value or value with minimum decrease output.

Measurement of the secondary (heating circuit) measurement was carried out similarly to primary side. They recorded temperature and heat transfer fluid flow rate (Fig. 4). The generated output (as presented in Fig. 5) is used to heat hall areas ŽU through heating unit FLOWAIR LEO FB 15 kW.

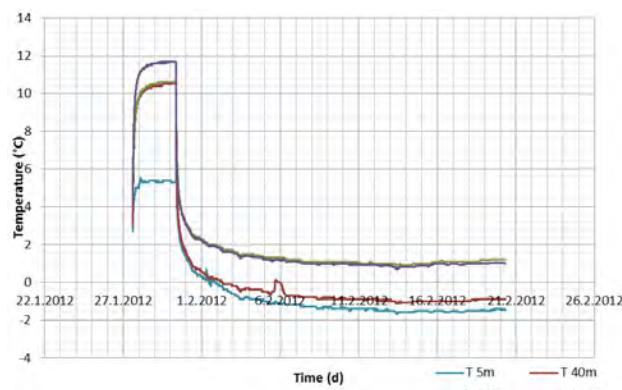


Fig. 4. Decrease in temperature in different depths of the ground

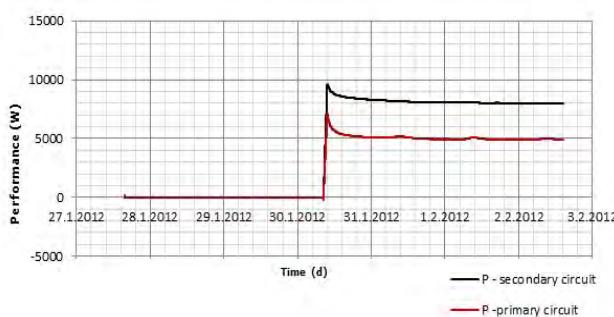


Fig. 5. Changes performance of primary circuit and overall performance of heat pump

3. Conclusions

As mentioned, the temperature of working substance in borehole affects the thermal parameters of secondary circuit HP. Due to low outdoor temperatures to reduce water temperature in secondary circulation (increased heat loss to the building). The primary circuit is increased and performance has been re-rising water temperature. The current outside temperature climb to procedure day to compensate for heating water in the system and gradually there was a leveling off of the original value of 48/42°C. On subsequent days, the process is repeated with decreasing night temperature,

while a slight drop in overall temperature reduction due to potential well on the primary side. Due to changes in ambient temperature there is an increase in heat output obtained from a borehole and a slight increase in the overall performance of heat pumps. At low temperatures there was therefore an increase in coefficient of performance COP. This change was very small and can not be considered significant. As confirmed by experiments, changes in external ambient temperature affect performance of HP at least. But more important is the decline performance in long-term performance of HP maximum power influence reduce of potential the ground (Fig. 4). Over time, operating temperature bore potential ground falls, resulting in reduction potential temperature of heating water in the system. This change is noticeable and significant only at very low ambient temperatures during the winter months.

Acknowledgement

Article was prepared under the operational program Research and Development ITMS – 26220220057 "device uses low-potential geothermal heat without forced circulation of heat carrier in a deep borehole".

References

- [1] Kapjor A., Hužvar J., Pilát P.: *Vplyv prevádzkových podmienok na teplotu kompresora v tepelnom čerpadle*, Erin 2011, 5th annual international travelling conference for young researchers and PhD students, Vysoké Tatry, 2011.
- [2] Lenhard R., Jandačka J., Jakubský M.: *Zariadenia na simuláciu transformácie nízkopotenciálneho geotermálneho tepla na teplo vhodné pre vykurovanie*, Zborník prednášok zo 17. medzinárodnej vedeckej konferencie Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín, Žilina: EDIS, 2010. p. 185.
- [3] Kapjor A., Lenhard R., Horváth Z.: *Power dependence of floor convector on its geometry*, TRANSCOM 2007: 7-th European conference of young research and science workers: Žilina June 25–27, 2007, Slovak Republic, Section 7: Machines and equipment. Applied mechanics, Žilina: University of Žilina, 2007.
- [4] Čaja A., Malcho M., Nemec P., Kolková, Z.: *Comparison of performance parameters of gravitational heat pipes using different working substances*, In: ERIN (Education, Research, Innovation): journal of Slovak university of technology in Bratislava, pp. 25–29.
- [5] Lenhard R., Malcho M.: *Numerical simulation device for the transport of geothermal heat with forced circulation of media*, in: Mathematical and Computer Modelling, Vol. 57, Iss. 1–2, (2013), pp. 111–125.

PAWEŁ STAWCZYK

Kielce University of Technology

e-mail: pawle83@o2.pl

HARMONIC REDUCTION TECHNIQUES USING MULTI-PULSE RECTIFIERS

Abstract

AC/DC converters generate high harmonic currents and voltages into the power system, which causes a deformation of their shapes and increases active power losses. This article gives short review about basic methods of reduction of higher harmonics in phase currents of AC/DC converters consisting of parallel connected 6-pulse bridges.

Keywords: AC/DC converter, power quality, THD (Total Harmonic Distortion), autotransformer

1. Introduction

In recent years, the harmonics in the power system appear due to the wide applications of the electronic equipments in which the AC/DC converter are usually used. Therefore, it is very important to reduce harmonic components in supply currents of the AC/DC converters. The harmonic problems can be solved by using the active filters which usually operate at high switching frequency and are not suitable for high power applications. The power factor and total harmonic current distortion THD_i of the input line current can be improved by using of the multi-pulse AC/DC converter. The total harmonic current distortion THD_i is described by formula:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} / I_1 - 100\% = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^{*2}} \quad (1)$$

where: I_h^* – relative current component of h - harmonic order.

Multi-pulse AC/DC converters generate odd current harmonics order:

$$h = k \cdot q \pm 1 \quad (2)$$

where k – number of parallel connected 6-pulse bridges, q – number of pulses

As results from (2) an increase in pulse number q is the basic method to eliminate high harmonic currents. One obtains an increase in q in classical solutions by series or parallel connection of p number of 3-phase bridges supplied by transformers with required phase shifting.

$$\phi = \frac{2\pi}{q p} \quad (3)$$

Another method is based on the use of rectifiers with modulators in DC current circuits.

2. Multi-pulse AC/DC rectifiers

Figure 1 shows modified systems consisting of 6-pulse rectifiers. They behave approximately as 24-pulse (Fig. 1a) and 36-pulse (Fig. 1b) rectifiers in consequence of alternate conducting of diodes and thyristors connecting to terminals of the interphase transformer. The depth of asymmetry in load of each of component rectifiers depends of turn number of reactor segments in consequence improve the power quality.

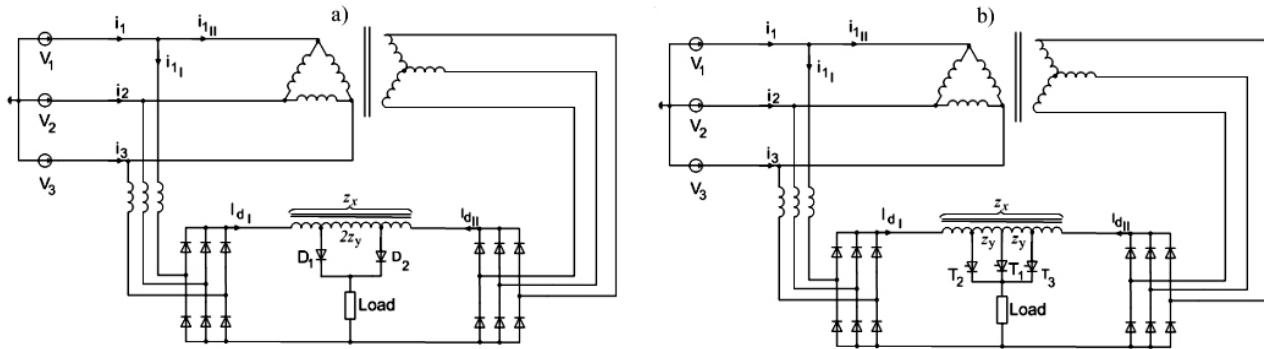


Fig. 1. Diode rectifiers with modulation in DC current: a) 24-pulse, b) 36-pulse [4]

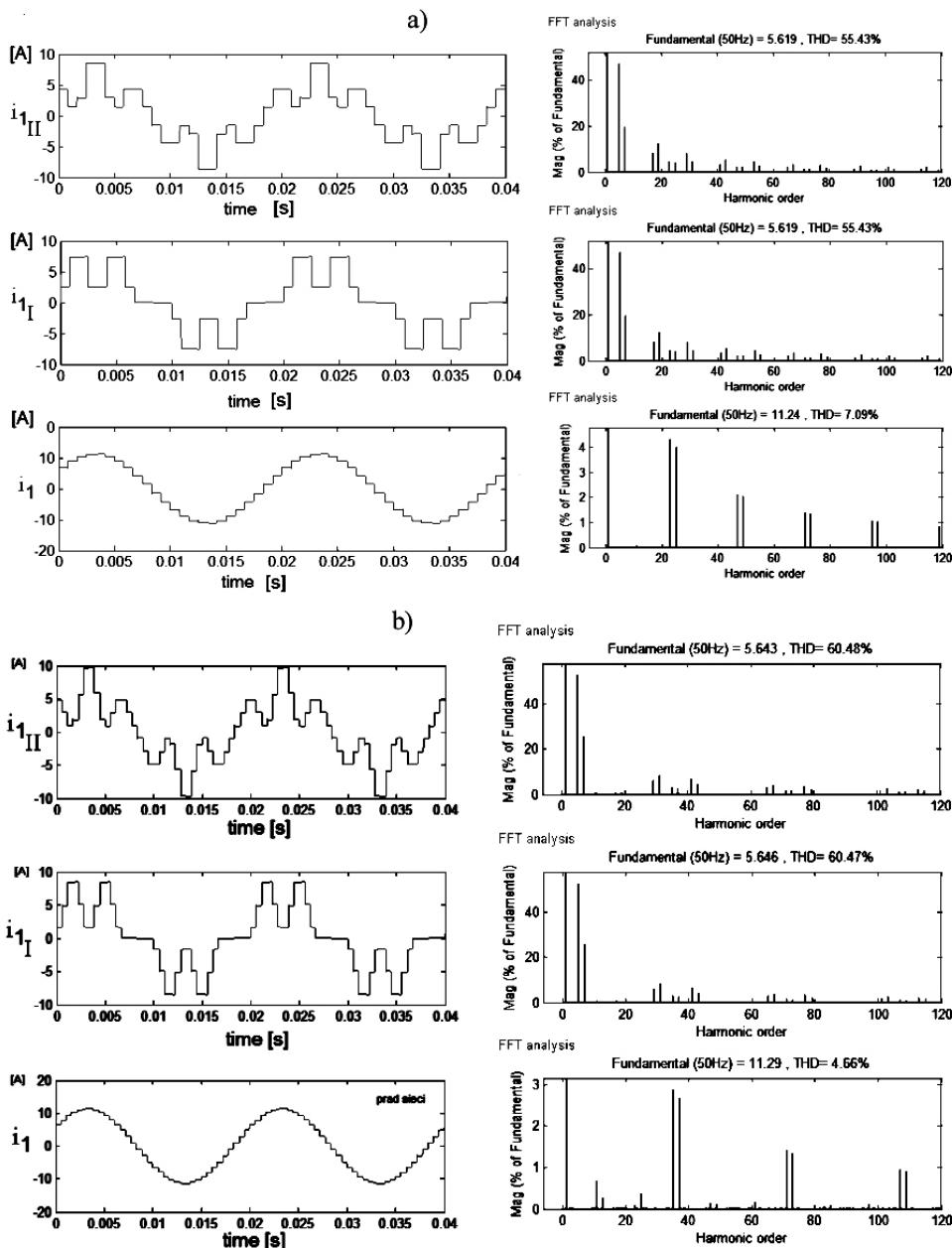


Fig. 2. Line currents of component bridges and rectifier and their FFT analysis in: a) 24-pulse, b) 36-pulse mode [1, 3]
 i_{1I} , i_{1II} – phase supply currents of component bridges

$$i_{l_1} = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot (0.5 \mp a) \cdot I_d \cdot \cos(n \frac{2\pi}{q}) \quad (4)$$

$$i_{l_{II}} = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot (0.5 \pm a) \cdot I_d \cdot \cos(n \frac{2\pi}{q} + \frac{\pi}{12})$$

where: a – takes values: a_x , $-a_x$ for converter in Figure 1a and a_x , $-a_x$, 0 for converter in Figure 1b, q – number of pulses, I_d – DC current.

The 36-pulse rectifier offers a higher quality input current (line current) while that of the 24-pulse rectifier is distorted. The THD of the 24-pulse rectifier equals 7.09% but for 36-pulse rectifier 4.66%.

Another type of modulation in DC current circuit in the form of interphase transformer is presented in Figure 3 [7]. Primary winding of the transformer is supplied from AC current modulator. The shape and magnitude of AC current transformed from primary to secondary winding determines the depth of load asymmetry of rectifier component bridges.

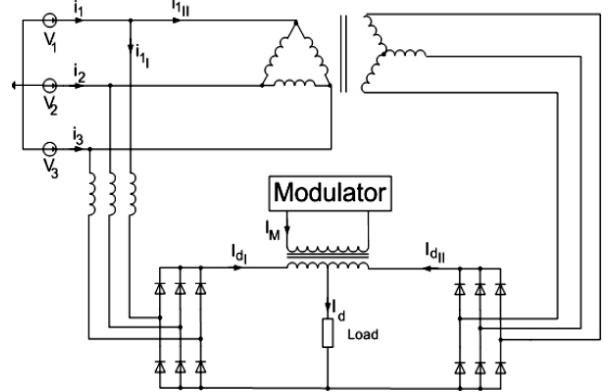


Fig. 3. 12-pulse rectifier with modulation in DC circuit [3]

The shape of line current of the converter is close to sinusoidal one. The total harmonic current distortion THD_i in this case is equal to 1.03%.

3. Conclusions

Conventional AC/DC converters are developed using diodes and thyristors to provide controlled and uncontrolled unidirectional and bidirectional

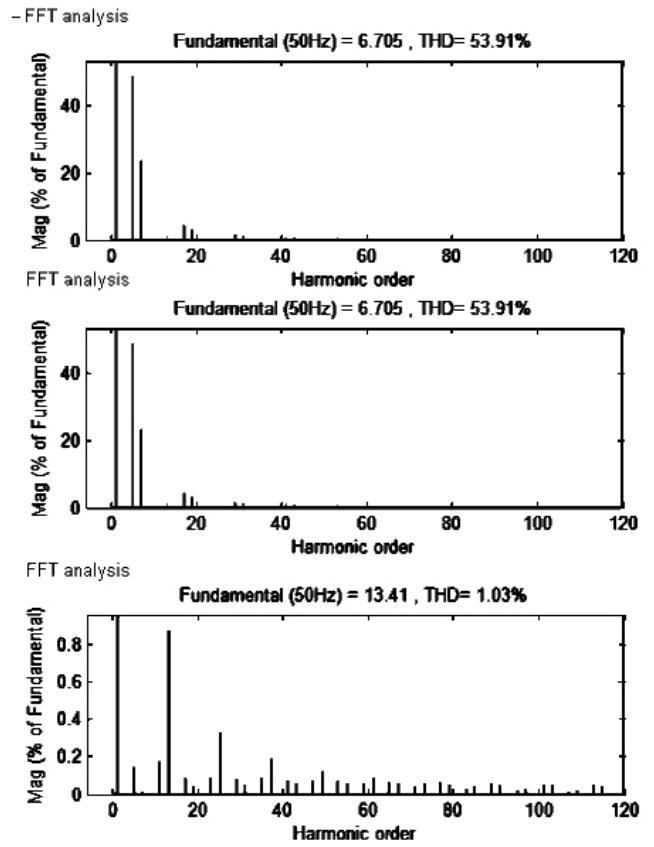
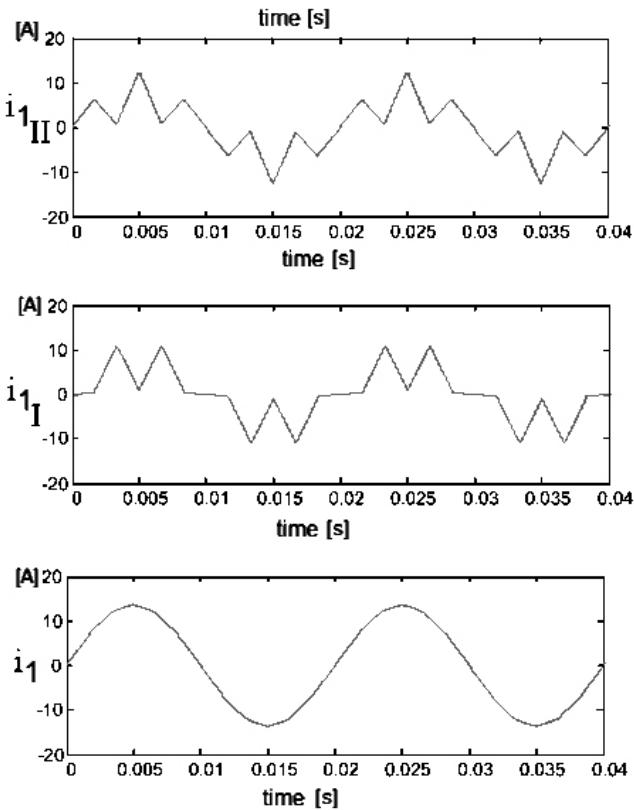


Fig. 4. Line currents of component bridges and rectifier and their FFT analysis [3]

dc power, however, these converters have problems of poor power quality in terms of injected current harmonics, resultant voltage distortion and slowly varying rippled DC output at load end, low efficiency, and large size of AC an DC filters.

High-power applications use AC/DC converters based on the concept of multipulse mode (namely: 12-, 24-, 36-pulse) to reduce the harmonics in AC supply currents, to overcome presented drawbacks and to fulfil contemporary power quality standards. The variation of harmonics in the input current for different pulse numbers is shown Table 1.

Table 1. Variation of THD with pulse number

Pulse number	THD [%]
6	34.5
12	14.5
24	7.09
36	4.66

It is possible to further improve the THD using the modulator in the DC circuit shown in Figure 3. The value of THD for this case is 1.03%, which is a very good result. Multi-pulse rectifiers with modulation in DC current circuit meets the standards specified for connecting devices I and II quality [8].

References

- [1] Rolek J.: *Układy prostowników wielopulsowych z modulacją w obwodzie prądu stałego (Multi-pulse rectifiers with modulation in DC current)*, „Przegląd elektrotechniczny”, R. 84 5, 2008.
- [2] Anrvindan A.N., Pushpakar thick P.: *24-pulse rectifier realization b 3-phase to four 3-phase transformation using conventional transformer*, NPEC 2010.
- [3] Kaplon A., Rolek J.: *Analysis of Multipulse Rectifiers with Modulation in DC Circuit in Vector Space Approach*. 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008).
- [4] 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.
- [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 on, pp. 2251–2255.
- [7] Strzelecki R., Supronowicz H.: *Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy (Power factor in AC power supply systems and methods of its improvement)*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [8] Minister of Economic Affairs 4 May 2007 In the specific conditions of power system (29 May 2007) (original: Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. W sprawie szczególnych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (29. maj. 2007)), Warszawa

Paweł Stawczyk

Metody redukcji wyższych harmonicznych z wykorzystaniem prostowników multipulsowych

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach z powodu znacznej liczby urządzeń elektrycznych zasilonych z prostowników AC/DC wzrasta zawartość wyższych harmonicznych prądów w sieciach zasilających. Redukcja harmonicznych, które pojawiają się w prądach zasilających przekształtniki AC/DC jest zatem bardzo ważnym problemem. Zmniejszenie udziału wyższych harmo-

nicznych uzyskuje się między innymi przy pomocy filtrów aktywnych pracujących z wysoką częstotliwością przełączeń, które jednak nie są przystosowane do pracy w układach wysokiej mocy. Poprawienie współczynnika mocy oraz całkowitego współczynnika odkształcenia prądu THD, można uzyskać stosując wielopulsowe przekształtniki AC/DC. Całkowity współczynnik odkształcenia prądu określa wzór (1).

Wielopulsowe przekształtniki AC/DC generują nieparzysty rząd harmonicznych prądu – wzór (2).

Jak wynika z powyższej zależności zwiększenie liczby pulsów q jest podstawową metodą pozwalającą na wyeliminowanie wyższych harmonicznych w prądach zasilających. W klasycznych rozwiązańach 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 – wzór (3).

Innym rozwiązaniem jest prostownik multipulsowy z modulatorem w obwodzie prądu stałego.

2. Wielopulsowe prostowniki AC/DC

Na rysunku 1 pokazano dwa przykładowe rozwiązania zawierające dwa trójfazowe układy mostkowe wykazujące właściwości pracy prostownika 24-pulsowego (rys. 1a) oraz 36-pulsowego (rys. 1b) wskutek przemiennej przewodzenia diod oraz tyrystorów podłączonych do zacisków dławika kojarzącego. Stopień asymetrii w obciążeniu każdego z mostków zależy od liczby odczepów dławika kojarzącego, co znacząco wpływa na poprawę jakości energii.

Prostownik 36-pulsowy oferuje mniej odkształcone prądy zasilające w stosunku do prostownika 24-pulsowego. W przypadku prostownika 24-pulsowego całkowity współczynnik odkształcenia THD wynosi 7,09%, natomiast dla prostownika 36-pulsowego współczynnik ten wynosi 4,66%.

Innym sposobem pozwalającym na zmniejszenie współczynnika THD, prądów pobieranych z sieci jest transformator międzyfazowy, który pełni funkcję modulatora, co pokazano na rysunku 3 [7]. Pierwotne uzwojenie transformatora zapewnia wzajemne skojarzenie składowych mostków, natomiast uzwojenie wtórne pełni funkcję obwodu modulującego. Kształt oraz wartość prądu przemiennego AC transformowanego z uzwojenia pierwotnego do uzwojenia wtórnego transformatora wyznacza stopień asymetrii obciążenia składowych mostków.

Kształt prądu liniowego takiego przekształtnika jest bliski sinusoidalnemu. Całkowity współczynnik odkształcenia prądu THD, wynosi 1,03%.

3. Wnioski

Klasyczne przekształtniki AC/DC zbudowane w oparciu o diody oraz tyristory zapewniają kontrolowany oraz niekontrolowany jedno lub dwukierunkowy przepływ mocy. Ich wadą jest: pogorszenie jakości energii z powodu wyższych harmonicznych

prądu, odkształcenie napięcia wypadkowego, tężenie napięcia wyjściowego DC, niska sprawność układu oraz znaczny rozmiar filtrów AC oraz DC.

Przekształtniki bazujące na koncepcji pracy wielopulsowej (mianowicie: 12-, 24-, 36-pulsowe) stanowiące zasilanie układów wysokiej mocy redukują wyższe harmoniczne prądy zasilających, wpływając na wyeliminowanie przedstawionych wyżej wad oraz zapewniają spełnienie aktualnych standardów jakości energii. W tabeli 1 pokazano przykłady współczynnika odkształcenia THD dla różnej liczby pulsów q .

Dalsze zmniejszenie współczynnika THD możliwe jest dzięki zastosowaniu modulatora w obwodzie prądu stałego, co pokazano na rysunku 3. W przypadku powyższego rozwiązania współczynnik THD wynosi 1,03%, co jest bardzo niską wartością. Przekształtniki wielopulsowe z modulacją w obwodzie prądu stałego spełniają wysokie standardy przewidziane dla urządzeń przyłączeniowych klasy I oraz II.

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

