

STRUCTURE AND ENVIRONMENT

ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND ENERGY

No. 2/2017 vol. 9 PL ISSN 2081-1500 www.sae.tu.kielce.pl KIELCE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Contents

structure

LUCJAN KAMIONKA

ENERGY ASPECT IN SUSTAINABLE DESIGN USING THE EXAMPLE OF MULTI-CRITERIA METHODS OF BUILDING EVALUATION ASPEKT ENERGETYCZNY W PROJEKTOWANIU ZRÓWNOWAŻONYM NA PRZYKŁADZIE WIELOKRYTERIALNYCH METOD OCENY BUDYNKÓW	77
--	-----------

MAREK IWAŃSKI, MAŁGORZATA CHOLEWIŃSKA, ALEKSANDRA GORECZNA

INFLUENCE OF AGING ON THE PROPERTIES OF F-T WAX MODIFIED ROADWAY BITUMEN WPŁYW STARZENIA NA WŁAŚCIWOŚCI ASFALTÓW DROGOWYCH MODYFIKOWANYCH WOSKIEM SYNTETYCZNYM F-T	89
---	-----------

WIESŁAWA NOCUŃ-WCZELIK, MACIEJ NOWAK, EWA KAPELUSZNA

LIGHTWEIGHT MORTARS WITH EXPANDED PERLITE MODIFIED BY ADMIXTURES LEKKIE ZAPRAWY CEMENTOWE Z DODATKIEM PERLITU EKSPANDOWANEGO, MODYFIKOWANE DOMIESZKAMI	102
---	------------

AGNIESZKA WDOWIAK

DEFECTS IN STRUCTURAL TIMBER WADY DREWNA KONSTRUKCYJNEGO	112
---	------------

environment

MACIEJ HAJDUKIEWICZ, IHOR ROMANYSHYN

AN ACCURACY ASSESSMENT OF SPOT HEIGHTS ON DIGITAL ELEVATION MODEL (DEM) DERIVED FROM ALS SURVEY: CASE STUDY OF ŁYSICA MASSIF OSZACOWANIE DOKŁADNOŚCI PUNKTÓW WYSOKOŚCIOWYCH NA NMT MASYWU ŁYSICY Z POMIARÓW ALS	125
--	------------

HUBERT TRĘBACZ, PIOTR MICHNO

THE EVALUATION OF PLATINUM GROUP METALS (PGMS) AND THEIR RECOVERY FROM CAR CATALYTIC CONVERTERS OCENA ZAWARTOŚCI PLATYNOWCÓW I METOD ICH ODZYSKU Z SAMOCHODOWYCH REAKTORÓW KATALITYCZNYCH	133
--	------------

Editor-in-Chief:

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

International Advisory Board:

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

Associate Editors:

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

Secretary of the Editor Board:

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

Photos on the cover – author Agnieszka Wdowiak

www.sae.tu.kielce.pl

sae@tu.kielce.pl

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

The Journal published by the Kielce University of Technology

PL ISSN 2081-1500

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2017

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

www.wydawnictwo.tu.kielce.pl



Kielce University of Technology
2017



structure
structure

LUCJAN KAMIONKA
Kielce University of Technology
e-mail: luckam@tu.kielce.pl

ENERGY ASPECT IN SUSTAINABLE DESIGN USING THE EXAMPLE OF MULTI-CRITERIA METHODS OF BUILDING EVALUATION

ASPEKT ENERGETYCZNY W PROJEKTOWANIU ZRÓWNOWAŻONYM NA PRZYKŁADZIE WIELOKRYTERIALNYCH METOD OCENY BUDYNKÓW

Abstract

The article defines the concept of sustainable development. It shows the characteristics of sustainable buildings and sustainable development goals achieved in the design of new buildings. The article refers to the “passive house” standard and points to the aspect of energy efficiency as a key factor in the assessment of buildings in multi-criteria methods of LEED, BREEAM, Green Building and the method developed by the author of the article. The paper also emphasizes the need for applying multi-criteria evaluation of design solutions using specialized computer programs in the process of sustainable design. A group of industry experts, including professionals in the field of building energy assessment, should be involved in the process of assessment and verification of the applied solutions. Examples of buildings designed and erected in Poland, characterized by high quality design solutions in the field of energy efficiency have been provided. These developments have been awarded the Passivhaus, Green Building, LEED, BREEAM certificates.

Keywords: sustainable development, sustainable design, energy efficiency of the building

Streszczenie

W artykule określono pojęcie rozwoju zrównoważonego. Przedstawiono cechy budynków zrównoważonych oraz cele zrównoważonego rozwoju realizowane w projektowaniu nowej zabudowy miast. Przytoczono zdefiniowane parametry „budynku pasywnego” oraz przedstawiono aspekt energooszczędności jako kluczowy czynnik oceny budynków w wielokryterialnych metodach LEED, BREEAM, Green Building. Wskazano na konieczność stosowania w procesie zintegrowanego projektowania wielokryterialnej oceny rozwiązań projektowych z wykorzystaniem specjalistycznych programów komputerowych. W procesie oceny i weryfikacji zastosowanych rozwiązań uczestniczyć powinno grono specjalistów branżowych m.in. z zakresu energetyki budynku. Przytoczono przykłady budynków zaprojektowanych i realizowanych w Polsce, które charakteryzują się wysokiej jakości rozwiązaniami projektowymi z zakresu energooszczędności. Obiekty te otrzymały certyfikaty Passivhaus, Green Building, LEED, BREEAM.

Słowa kluczowe: rozwój zrównoważony, projektowanie zrównoważone, energooszczędność budynku.

1. Introduction

Today the world is facing serious threats to the environment and energy crises. Because of this, sustainable development has become the main strategy in the area of spatial planning. Sustainable development was defined in 1987 in the report called “Our Common Future” developed by the World Commission on Environment and Development of the United Nations, also known

1. Wstęp

W okresie zagrożenia środowiska, kryzysów energetycznych zrównoważony rozwój stał się główną strategią działań w gospodarce przestrzennej. Zrównoważony rozwój został zdefiniowany w roku 1987 w raporcie *Nasza wspólna przyszłość* (Our Common Future), opracowanym przez Światową Komisję do Spraw Środowiska i Rozwoju ONZ (The World Commission on Environment and Development),

as the Brundtland Report. The definition of the term of “sustainable development” was expressed in the declaration of “Agenda 21” adopted at the Earth Summit “Environment and Development” in Rio de Janeiro in 1992. The term refers to the use of decreasing natural resources and improving the quality of life of present and future generations. Sustainable development is development possible to continue in the long term without compromising environmental and social sustainability. In 2006, the European Council adopted a renewed Sustainable Development Strategy [7]. According to the strategy “Durable, sustainable development means that the needs of the present generation should be met without compromising the ability of future generations to meet their own needs”. Construction is the largest sector of the economy in the economic aspect, the largest in terms of the flow of raw materials. Most of the capital, both financial and natural, is invested in construction. The role of the construction and the architecture as branches of knowledge concerned with space forming in human surrounding is important in creating sustainable development, in which the energy aspect plays a significant role.

2. Energy saving in design

The problem of energy efficiency in architectural design in the conditions of modern civilization plays a key role [5]. The targets for the European Community for 2020, expressed in the so-called “Green Paper Energy Efficiency” [1] are as follows:

- achieving potential savings in buildings in terms of energy used for heating, air conditioning, hot water and lighting at 22%,
- achieving potential savings in buildings in terms of energy used for heating, air conditioning, hot water and lighting at 22%,
- doubling the share of renewable energy from 6% to 12% in the overall consumption of electricity,
- increasing the share of green electricity from 14% to 22% in the total consumption of energy.

Architecture is an important factor in the development of the environment while maintaining natural balance and permanence of basic natural processes. Specific objectives underlying sustainable development are considered while introducing new developments or upgrading existing urban fabric in cities [6]:

- reducing the demand for energy and natural resources through the adoption of energy-efficient

zwanym też Raportem Brundtland. Znaczenie nazwy „rozwój zrównoważony” zostało ustalone w deklaracji *Agenda 21* przyjętej na Szczycie Ziemi „Środowisko i Rozwój” w Rio de Janeiro w roku 1992. Terminem tym określono użytkowanie zmniejszających się zasobów naturalnych i podtrzymywanie wzrostu jakości życia obecnych i przyszłych pokoleń. Rozwój zrównoważony jest to rozwój możliwy do kontynuowania w długim okresie czasu bez naruszenia równowagi ekologicznej i społecznej. W roku 2006 Rada Europejska przyjęła odnowioną strategię zrównoważonego rozwoju Unii Europejskiej [7]. Według strategii trwały, zrównoważony rozwój oznacza, że potrzeby obecnego pokolenia należy zaspokajać bez uszczerbku dla możliwości zaspokajania potrzeb przez przyszłe pokolenia. Budownictwo jest największym sektorem gospodarki w aspekcie ekonomicznym, największym pod względem przepływu surowców. W budowie inwestuje się większość kapitału, zarówno finansowego, jak i naturalnego. Rola budownictwa, a także architektury jako dziedziny wiedzy kształtującej przestrzeń w otoczeniu człowieka jest istotna w kreowaniu rozwoju zrównoważonego, w którym to aspekt energetyczny odgrywa rolę znaczącą.

2. Energooszczędność w projektowaniu

Problem energooszczędności w projektowaniu architektury we współczesnych uwarunkowaniach cywilizacyjnych odgrywa kluczową rolę [5]. Ustalenia Wspólnoty Europejskiej na rok 2020, wyrażone w tzw. *Zielonej księdze efektywności energetycznej* [1], zakładają:

- realizację potencjalnych oszczędności w budynkach w zakresie energii zużytej na ogrzewanie, klimatyzację, ciepłą wodę i oświetlenie na poziomie 22%;
- podwojenie udziału odnawialnych źródeł energii z 6% do 12% w ogólnym zużyciu elektryczności;
- zwiększenie udziału ekologicznej energii elektrycznej z 14% do 22% w łącznym zużyciu energetycznym.

Architektura stanowi ważny element rozwoju środowiska z zachowaniem równowagi przyrodniczej oraz trwałości podstawowych procesów przyrodniczych. Realizując w miastach nową zabudowę czy też modernizując istniejącą tkankę urbanistyczną, dąży się do realizacji określonych celów rozwoju zrównoważonego [6]:

- zmniejszenie zapotrzebowania na energię i zasoby naturalne przez przyjęcie standardu budownictwa

construction standard and passive construction in the future,

- intelligent use of technology systems, the use of renewable sources of energy,
- rational use of natural resources, the use of environmentally friendly materials,
- developing the concept of logistics, which would lead to a reduction of transportation during the construction and later operation of the building,
- reducing the amount of pollution of air and water, reducing waste and sewage as well as waste heat,
- suitable framing and a combination of a development, surface, technical infrastructure and green space taking into account basic climatic factors of the area,
- maintaining the lowest possible level of sealing the surface.

The idea of design in accordance with the principles of sustainable development [2] has entered the stage of the universal realization. Multi-criteria building assessment methods codifying the standards of design and implementation have been created. Projects developed in accordance with established standards, are implemented and awarded certificates which enjoy increasing prestige among users. Although coded standards do not fully comprise the complex process of sustainable design in architecture, they attach the major importance to the aspect of the energy, highlighting the role of rational energy consumption.

3. Aspect of energy in building assessment methods

Design and construction standards of passive buildings were specified in the nineties. In 1991 the first passive house was built in Darmstadt and in 1996 the Passive House Institute was set up. The Institute in Darmstadt is run under the direction of Dr. Wolfgang Feist as an independent research unit. Passive building is a building with minimum energy requirements for heating the interior (no more than 15 kWh/m² year). Multi-criteria research methods dealing with issues of sustainable development were created in the nineties. The most important are:

- Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM), Great Britain,
- Building Environmental Performance Assessment Criteria (BEPAC), Canada,

energooszczędny, a w przyszłości budownictwa pasywnego,

- inteligentne stosowanie systemów techniki, wykorzystanie odnawialnych źródeł energii,
- racjonalne wykorzystanie zasobów naturalnych, stosowanie materiałów przyjaznych środowisku,
- rozwijanie koncepcji logistyki, która prowadziłaby do ograniczenia transportu podczas budowy i późniejszego funkcjonowania budynku,
- redukcja ilości zanieczyszczeń powietrza i wody, zmniejszenie ilości odpadów i ścieków oraz ciepła odpadowego,
- uwzględnienie podstawowej struktury klimatycznej obszaru przez odpowiednie kształtowanie i kombinację zabudowy, powierzchni, infrastruktury technicznej oraz ciągów zieleni,
- utrzymanie możliwie niskiego poziomu uszczelnienia powierzchni.

Idea projektowania w zgodzie z zasadami rozwoju zrównoważonego [2] wkroczyła w etap powszechnego urzeczywistnienia. Powstają wielokryterialne metody oceny budynków kodyfikujące standardy projektowania i realizacji. Opracowywane są projekty w zgodzie z ustalonymi standardami, które są realizowane i wyróżniane certyfikatami cieszącymi się coraz większym prestiżem wśród użytkowników. Kodowane standardy, choć nie ujmują w pełni złożonego procesu projektowania zrównoważonego w architekturze, aspekt energetyczny stawiają na miejscu wiodącym doceniając rolę, racjonalnej konsumpcji energii.

3. Aspekt energetyczny w metodach oceny budynków

Aspekt oszczędności energii w użytkowaniu budynku jest wiodący w funkcjonowaniu budynku pasywnego. W latach dziewięćdziesiątych określono parametry projektowania i wznoszenia budynków pasywnych. W roku 1991 wybudowano w Darmstadt pierwszy dom pasywny, a w roku 1996 utworzono Instytut Domów Pasywnych. Działa on w Darmstadt pod kierunkiem doktora Wolfganga Feista jako niezależna jednostka badawcza. Budynek pasywny to budynek o minimalnym zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania wnętrza (nie więcej niż 15 kWh/m² rok).

W latach dziewięćdziesiątych powstały wielokryterialne metody badawcze zajmujące się zagadnieniami rozwoju zrównoważonego. Do najważniejszych należą:

- Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM), Wielka Brytania,
- Building Environmental Performance Assessment Criteria (BEPAC), Kanada,

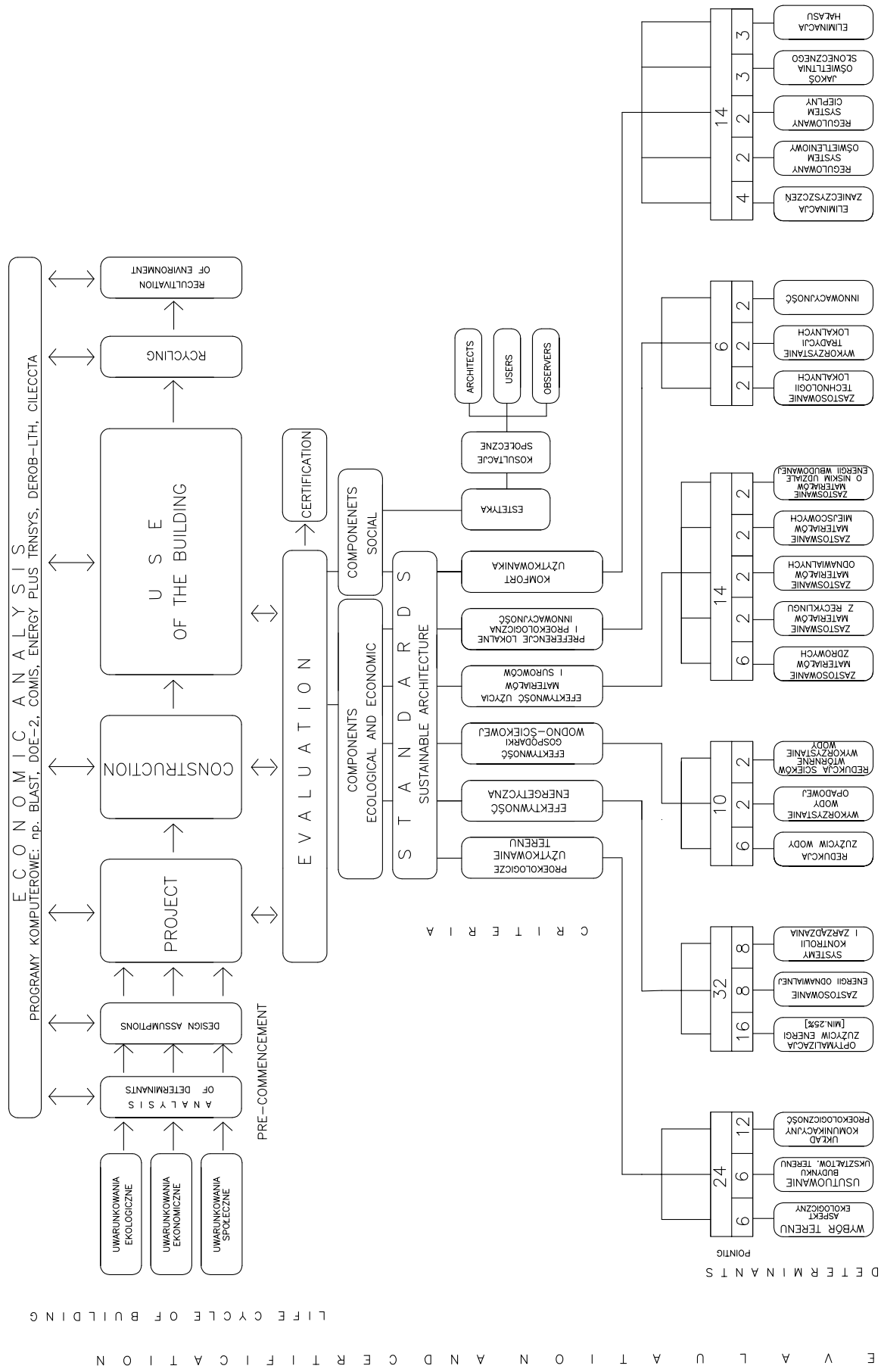


Fig. 1. The model of sustainable architecture assessment. Design and construction standards (L. Kamionka)
Rys. 1. Model oceny obiektu architektury zrównoważonej. Standardy projektowania i realizacji (autor metody L. Kamionka)

- Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), USA,
- Green Building Challenge (GBC), European countries, Japan, Canada, USA,
- Green Building – the European Union,
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), Germany.

The evaluation of design solutions should be subjected to multi-criteria assessment in the process of sustainable design [3]. The author has made an attempt to develop a method for evaluating sustainable architecture buildings [4]. This method could play a critical role in the application of sustainable design. It can be used in the design of various buildings (in terms of complexity and size) and at each of its stages.

The ideograph of the method is shown in Figure 1.

Computer programs simulating energetic performance of buildings, in various design solutions are more and more commonly used to carry out analyses. These programs have been continuously developed and are currently used as an important tool in the economic and performance analysis of LCC (Life Cycle Cost), LCA (Life Cycle Assessment), LCCA (Life Cycle Cost Analysis).

Computer software such as BLAST, DOE-2, Comis, ENERGY PLUS, TRNSYS, DEROB-LTH and CILECCTA plays an important role in the analysis of LCC, LCA, LCCA [7].

CILECCTA is a program that combines the efforts of scientists, industry associations and entrepreneurs in order to create software to support decision-making process in the design of sustainable buildings. The program, supported by the European Commission, has been adapted to conduct analyzes both at the level of the entire building and its components. The Polish program CERTO developed by the Lower Silesian Agency for Energy and Environment, which can be successfully used for the initial conceptual analysis is also worth noting.

4. Selected examples of certified buildings completed in Poland

It should be emphasized that increasing number of architectural developments are designed and completed in accordance with the codified standards of LEED, BREEAM, Green Building methods and the defined standards of passive building.

- Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), USA,
- Green Building Challenge (GBC), państwa europejskie, Japonia, Kanada, USA,
- Green Building – Unia Europejska,
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), Niemcy.

W procesie projektowania zrównoważonego ocenę rozwiązań projektowych należy poddać wielokryterialnej ocenie [3]. Autor podjął próbę opracowania metody oceniania obiektu architektury zrównoważonej [4]. Metoda ta może mieć duże znaczenie aplikacyjne w procesie projektowania zrównoważonego. Można ją stosować w procesie projektowania różnorodnych budynków (w aspekcie złożoności i wielkości) oraz na każdym z jego etapów.

Ideogram metody zaprezentowano na rysunku 1.

W przeprowadzanych analizach coraz częściej wykorzystywane są programy komputerowe symulujące zachowania energetyczne budynków, w różnych warunkowaniach projektowych. Programy te podlegały ciągłemu rozwojowi i aktualnie wykorzystywane są jako znaczące narzędzie w analizach ekonomiczno-energetycznych LCC (Life Cycle Cost), LCA (Life Cycle Assessment), LCCA (Life Cycle Cost Analysis).

Istotne znaczenie w analizach LCC, LCA, LCCA odgrywają programy komputerowe, takie jak: BLAST, DOE-2, COMIS, ENERGY PLUS, TRNSYS, DEROB-LTH oraz CILECCTA [7].

CILECCTA jest programem, w którym połączono wysiłki naukowców, stowarzyszeń przemysłowych i przedsiębiorców w celu stworzenia oprogramowania wspierającego proces decyzyjny przy projektowaniu budynków zrównoważonych. Program wspierany był przez Komisję Europejską. Dostosowany jest do prowadzenia analiz zarówno na poziomie całego budynku, jak i jego elementów. Należy też zwrócić uwagę na polski program CERTO opracowany przez Dolnośląską Agencję Energii i Środowiska, który z powodzeniem może być wykorzystywany do wstępnych koncepcyjnych analiz.

4. Przykłady realizacji w Polsce

Należy podkreślić, że w Polsce coraz liczniej są projektowane i realizowane obiekty architektoniczne w zgodzie ze skodyfikowanymi standardami metod LEED, BREEAM, Green Building oraz zdefiniowanymi standardami budynku pasywnego.

4.1. Passive House Building

The first passive house project in Poland was carried out in Smolec near Wrocław in 2007 (by the architects Lipiński). The maximum solar heat gain was achieved by appropriate location of the windows on the house facade. Large windows on the south-west facade ensure the solar radiation energy gains. The design of the house resembles the traditional, except for innovations imposed by the large glass surfaces of walls of the dining room and living room. A living room with an entresol forms a general use zone, which joins the interior of the house. The compact nature of the building is confirmed by the A/V ratio of 0.75, and an independent garage on the west side of the building acts as a heat buffer. The calculated heat demand is 13.7 kWh/m² per year. 30-44 cm-thick insulating layer of Platinum Plus Styrofoam was used for thermal insulation of walls, which resulted in obtaining the U-Value at approx. 0.1 kWh/m².

4.1. Budynek z certyfikatem Passivhaus

Pierwszy projekt domu pasywnego w Polsce został zrealizowany pod Wrocławiem w Smolcu w roku 2007 (arch. Lipiński). Maksymalizację solarnych zysków ciepła osiągnięto dzięki odpowiedniemu rozmieszczeniu okien na fasadach domu. Duże okna na południowo-zachodniej elewacji zapewniają dodatkową energię od promieniowania słonecznego. Funkcję domu rozwiązano w sposób zbliżony do tradycyjnego, jednak z elementami innowacyjnymi narzuconymi przez duże przeszklone płaszczyzny ściany jadalni i pokoju dziennego. Strefę ogólnego użytkowania tworzy pokój dzienny z antresolą, która spaja wnętrze domu. Kompaktowy charakter budynku potwierdza A/V wynoszący 0,75, a dostawiony od strony zachodniej garaż, o niezależnej konstrukcji, pełni rolę bufora ciepła. Wyliczone zapotrzebowanie ciepła wynosi 13,7 kWh/m² na rok. Do izolacji termicznej ścian zastosowano warstwę izolacyjną grubości 30-44 cm ze styropianu Platinum Plus, dzięki czemu uzyskano współczynnik U równy ok. 0,1 kWh/m².



Photo 1. Passive House in Podzamcze Chęcińskie, 2014 (source: budimont.pl)
 Fot. 1. Dom Pasywny w Podzamczu Chęcińskim, 2014 r. (źródło: budimont.pl)

The walls are made of ceramsite hollow blocks. An additional advantage of this solution is their high thermal mass. The roof truss is made in the traditional way using wooden rafters with the use of thermal insulation reaching a total thickness of about 45 cm. The heat transfer coefficient reached the value of 0.08 kWh/m^2 . Certified windows and doors with the coefficient $U = 0.7 \text{ kWh/m}^2$ were used. Mechanical ventilation with heat recovery was applied and a counterflow heat exchanger positioned below the freezing depth at a depth of 1.5-2.0 m was installed. In the winter the air temperature, which is supplied to the building does not fall below zero, while in the summer it is cooled so that it is perceived as pleasant. Currently, more and more attempts are made to design and complete buildings with passive features. In 2014 Świętokrzyskie Centre for Innovation and Technology Transfer completed a demonstration passive building in Podzamcze Chęcinskie near Kielce (photo 1).

4.2. Certified Green Buildings

Atrium City office building, located in the centre of Warsaw, in 2009 achieved, as the first in Poland, green building certification from the European Commission (photo 2). The building has all features characteristic for projects in line with the standards of "Green Building", i.e. increased energy efficiency, high comfort and architectural value (architects Kazimierski & Ryba). Atrium City is located in al. Jana Pawła II, in the immediate vicinity of the UN roundabout. Atrium City is a Class A office building. It meets the highest standards in terms of both energy efficiency and comfort, technology and safety. The building uses such solutions as raised floors, channel radiators, air conditioning system based on chilled beams, access control systems, video surveillance.

Half of the energy consumed during the building operation is used for the needs of facilities inside the building. The other half is directly consumed by the tenants, users of the building. The building is monitored by Integrated Building Management System BMS. The building uses building envelopes of higher standards than required by applicable standards and legal and technical regulations. The system of ventilation and air conditioning uses the air removed from the office space to heat the atrium levels and garages. The level of solar lighting is integrated with lighting facilities in rooms. Lighting of the common parts of the building is

Ściany wykonano z pustaków keramzytowych. Dodatkowym atutem takiego rozwiązania jest ich duża masa akumulacyjna. Więźbę dachową wykonano w sposób tradycyjny z krokwi drewnianych z zastosowaniem izolacji termicznej o łącznej grubości ok. 45 cm. Współczynnik przenikania ciepła osiągnął wartość $U = 0,08 \text{ kWh/m}^2$. Zastosowano certyfikowaną stolarkę okienną i drzwiową o współczynniku $U = 0,7 \text{ kWh/m}^2$. Zaprojektowano wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła oraz zastosowano przeciwprądowy wymiennik ciepła ułożony poniżej strefy przemarzania na głębokości 1,5-2,0 m. W okresie zimowym temperatura powietrza, która jest dostarczana do budynku, nie spada poniżej zera, zaś w okresie letnim jest schładzana do przyjemnych w odczuciach temperatur. Aktualnie podejmowanych jest coraz więcej prób projektowania i budowy budynków pasywnych. W roku 2014 Świętokrzyskie Centrum Innowacji i Transferu Technologii zrealizowało pokazowy budynek pasywny w Podzamczu Chęcińskim k. Kielc (fot. 1).

4.2. Budynek z certyfikatem Green Building

Biurowiec Atrium City położony w centrum Warszawy w roku 2009 jako pierwszy w Polsce otrzymał od Komisji Europejskiej certyfikat Green Building (fot. 2). Budynek posiada wszystkie cechy charakterystyczne dla projektów realizowanych zgodnie ze standardami Green Building, tj. podwyższoną energooszczędność, wysoki komfort użytkowania oraz dbałość o walory architektoniczne (arch. Kazimierski & Ryba). Atrium City zlokalizowany został na al. Jana Pawła II, w bezpośrednim sąsiedztwie ronda ONZ. Atrium City jest biurowcem klasy A. Obiekt spełnia najwyższe standardy zarówno w zakresie energooszczędności, jak i komfortu użytkowania, rozwiązań technicznych i bezpieczeństwa użytkowania. Zastosowano podniesione podłogi, grzejniki kanałowe, system klimatyzacji oparty na belkach chłodzących, systemy kontroli dostępu, monitoring całodobowy.

Połowa zużywanej podczas eksploatacji energii wykorzystywana jest na potrzeby działania instalacji wewnątrz budynku. Druga połowa to bezpośrednia konsumpcja najemców, użytkowników budynku. Całość obiektu nadzoruje zintegrowany system zarządzania budynkiem BMS. W budynku zastosowano przegrody zewnętrzne o lepszych parametrach niż wymagają obowiązujące normy i przepisy prawno-techniczne. Zastosowany system wentylacyjno-klimatyzacyjny wykorzystuje powietrze usuwane z przestrzeni biurowej do ogrzania przestrzeni atrium i poziomów garaży. W budynku zintegrowano poziom nasłonecznienia z oświe-

integrated with the Central Building Management System and thus its intensity is adapted to the external conditions (time of day, level of cloud cover). Reducing energy consumption is a real economic benefit – from lower investment through lower maintenance, technical equipment and lower operating costs of the building [4].

tleniem pomieszczeń. Oświetlenie części wspólnych budynku jest zintegrowane z Centralnym Systemem Zarządzania Budynkiem i dzięki temu jego natężenie jest dostosowane do warunków zewnętrznych (pora dnia, poziom zachmurzenia). Obniżenie zużycia energii to realne korzyści ekonomiczne – od niższych nakładów inwestycyjnych, poprzez niższe koszty serwisu, urządzeń technicznych i niższe koszty eksploatacji budynku [4].



*Photo 2. Atrium City. The view from the John Paul II Avenue (the photo by the author)
Fot. 2. Atrium City. Widok od strony al. Jana Pawła II (zdjęcie autora)*

4.3. LEED-certified buildings

In 2009, Borg Warner (photo 3) – a plant producing turbochargers and components for the air supply and the reduction of harmful substances in cars and commercial vehicles, owned by the American company was opened in Podkarpacki Scientific-Technical Park in Rzeszów. As befits an American company the building was completed in accordance with LEED standards. It was the first building in Poland to obtain LEEDS certification. External walls and the roof meet the highest standards of insulation. The construction, the materials used as well as the technologies applied correspond to ecological conditions. The facilities use automatic power management, which clearly affects its energy balance.

4.3. Budynki z certyfikatem LEED

W roku 2009 został otwarty w Podkarpackim Parku Naukowo-Technicznym w Rzeszowie zakład należący do amerykańskiego koncernu Borg Warner (fot. 3) produkujący turbosprężarki oraz komponenty układów doprowadzania powietrza i redukcji substancji szkodliwych w pojazdach osobowych i użytkowych. Jak przystało na amerykański koncern obiekt został zrealizowany zgodnie ze standardami LEED, i jako pierwszy w Polsce otrzymał certyfikat. Konstrukcja ścian zewnętrznych i dachu odpowiada najwyższym standardom izolacyjności. Realizacja obiektu, zastosowane materiały, jak również technologie odpowiadają warunkom ekologicznym. W kompleksie zastosowano automatyczne zarządzanie energią co wyraźnie wpływa na jego bilans energetyczny.



Photo 3. Borg Warner building in Rzeszów under construction (source: inwestycje.rzeszow.pl)

Fot. 3. Budynki koncernu Borg Warner w Rzeszowie w trakcie realizacji (źródło: inwestycje.rzeszow.pl)

In 2011 Rondo 1 office building obtained the gold level LEED certificate and was the first building in Poland, which joined the certification process after it was completed, i.e. in 2009. The building contains a conference center, cafes, bistros, a supermarket, banks, SPA. Its structural height is 159 m. It has 40 storeys above ground. Lighting control systems in the building make use of Dali systems. The office building also uses 10% of the energy generated by wind power. Water consumption has been reduced by

W roku 2011 certyfikat LEED poziom złoty otrzymał biurowiec Rondo 1 jako pierwszy budynek w Polsce, który przystąpił do certyfikacji już po zrealizowaniu, tj. w roku 2009. W budynku znajdują się także centrum konferencyjne, kawiarnie, bistra, supermarket, banki, SPA. Wysokość strukturalna – 159 m, ilość kondygnacji nadziemnych – 40. W budynku zastosowano kontrolę oświetlenia poprzez systemy technologii cyfrowej „dali”. Biurowiec wykorzystuje także 10% energii wytworzonej przez elektrownię wiatrową. Zmniejszo-

30%. It should be also noted, that the office complex – the seat of Skanska-Property located in Atrium City (Warsaw, al. Jana Pawła II) received in 2010 the silver level LEED certificate [4].

4.4. BREEAM – certified buildings

In Poland in 2010, three complexes and office facilities that received BREEAM certificates were put into operation. These were Trinity Park III and Crown Square (photo 4) – facilities in Warsaw and Business Point completed in Katowice. The buildings incorporate energy-efficient air conditioning systems, ventilation, heating and lighting as well as energy-efficient elevators. The buildings have an extensive system of automatic management of BMS. The materials were subjected to strict selection in terms of ecology. The choice of curtain facade system was preceded by specialized analyses concerning energy savings.

no zużycie wody o 30%. Należy zauważyć, że zespół biurowy –siedziba Skanska-Property zlokalizowany w Atrium City (Warszawa, al. Jana Pawła II) otrzymał w roku 2010 certyfikat LEED – poziom srebrny [4].

4.4. Budynki z certyfikatem BREEAM

W Polsce w roku 2010 oddano do użytku trzy kompleksy biurowo-konferencyjne, które otrzymały certyfikaty BREEAM. Są to Trinity Park III i Crown Square (fot. 4), obiekty zrealizowane w Warszawie, oraz Business Point zrealizowany w Katowicach. W budynkach zastosowano energooszczędne systemy klimatyzacji, wentylacji, ogrzewania i oświetlenia, jak również energooszczędne windy. Budynki posiadają rozbudowany system automatycznego zarządzania BMS. Zastosowane materiały poddane zostały ścisłej selekcji w aspekcie ekologicznym.. Wybór systemu kurtyn elewacyjnych poprzedzony został specjalistycznymi analizami w aspekcie oszczędności energetycznej.



Photo 4. The elevations of Crown Square, Warsaw, the view from the street side – the entrance area (the photo by the author)
Fot. 4. Elewacje budynku Crown Square, Warszawa, widok od strony ulicy – strefa wejścia (zdjęcie autora)

Trinity Park III located in Warsaw in Domaniewska street (architects Jaspers & Evers Partners) has 6 tiers above and 3 floors below ground.

Crown Square office and conference center (architects Ludwik Konior & Partners) located in Warsaw in Przyokopowa street has 13 floors above and 3 underground floors housing parking spaces for 227 vehicles.

Katowice Business Point office-conference facilities (arch. Jaspers & Evers Partners, Czora & Czora) is located in close proximity to Silesia City Center in Katowice. The hotel has 11 floors above ground and 3 underground tiers with a garage with approximately 200 parking spaces.

5. SUMMARY

Energy aspect in the design of modern buildings is a key aspect. Multi-criteria building evaluation methods such as LEED, BREEAM, Green Building and the method developed by the author of the article define energy standards for the operation of enclosed structures. These standards are more stringent than the national standards. Defined standards of a passive building impose the operation of a facility based solely on passive energy sources. The following factors, which should be analyzed during the design process, affect the energy efficiency of the building:

- location of the building,
- use of renewable energy sources,
- make use of green spaces,
- the shape of the building,
- facility layout,
- construction of the building and building partitions,
- design and quality of the glass coating,
- quality of technical infrastructure and devices used,
- Integrated Building Management System – BMS.

In order to achieve the desired results, the process of sustainable design should be carefully prepared with the participation of specialists, including professionals in the field of energy building. Adopted design solutions should be subjected to multi-criteria analysis. This approach can guarantee the application of optimal solutions. The method of building evaluation, developed by the author, may have important application in the process of sustainable design, and is worth recommending [4].

In Poland, more and more buildings are designed and implemented in accordance with the principles of sustainable development and energy aspect plays

Trinity Park III – obiekt zlokalizowany w Warszawie przy ulicy Domaniewskiej (arch. Jaspers & Evers Partners) posiada sześć kondygnacji nadziemnych oraz trzy kondygnacje podziemne.

Crown Square – centrum biurowo-konferencyjne (arch. Ludwik Konior & Partners) zrealizowane w Warszawie przy ulicy Przyokopowej posiada trzynaście kondygnacji nadziemnych i trzy kondygnacje podziemne mieszczące parking dla 227 pojazdów.

Katowice Business Point – zespół biurowo-konferencyjny (arch. Jaspers & Evers Partners, Czora & Czora) zrealizowano w pobliżu Silesia City Center w Katowicach. Obiekt posiada jedenaście kondygnacji nadziemnych oraz trzy kondygnacje podziemne z garażem wyposażonym w ok. 200 miejsc parkingowych.

5. Podsumowanie

Aspekt energetyczny w projektowaniu współczesnych budynków jest kluczowy. Wielokryterialne metody oceny budynków, takie jak LEED, BREEAM, Green Building określają standardy energetyczne funkcjonowania obiektów kubaturowych, które są bardziej rygorystyczne od norm krajowych. Zdefiniowane parametry budynku pasywnego zakładają użytkowanie obiektu wyłącznie w oparciu o pasywne źródła energii. Na energooszczędność budynku wpływają określone czynniki, które winny być analizowane w procesie projektowania:

- lokalizacja i usytuowanie,
- wykorzystanie źródeł energii odnawialnej,
- wykorzystanie zieleni,
- ukształtowanie bryły budynku,
- rozmieszczenie funkcji użytkowych,
- konstrukcja budynku i przegród budowlanych,
- konstrukcja i jakość powłok szklanych,
- jakość infrastruktury technicznej i zastosowanych urządzeń,
- zintegrowany system zarządzania budynkiem – BMS.

Aby osiągnąć pożądane rezultaty, należy starannie przygotować proces zintegrowanego projektowania z udziałem specjalistów, m.in. z zakresu energetyki budynku, poddając wielokryterialnej analizie przyjęte rozwiązania projektowe. Taki sposób działania może zagwarantować zastosowanie optymalnych rozwiązań. Opracowana przez autora metoda oceny budynków [4] może mieć duże znaczenie aplikacyjne w procesie projektowania zrównoważonego i warta jest polecenia.

W Polsce coraz więcej obiektów jest projektowanych i realizowanych zgodnie z zadaniami zrównoważonego rozwoju, a aspekt energetyczny odgrywa wiodącą

a leading role. Increasing number of buildings are obtaining certificates, which confirm the quality of the sustainable design.

czą rolę. Coraz więcej budynków posiada certyfikaty świadczące o zastosowanej jakości projektowania zrównoważonego.

References

- [1] Biuletyn Polskiego Towarzystwa Certyfikacji Energii. Nr 3 (s. 1-2). Poznań, wrzesień 2005.
- [2] Kamionka L.: *Zagadnienia oceny i certyfikacji obiektów architektury zrównoważonej*. Kwartalnik „Architektura i Urbanistyka”. Polska Akademia Nauk. Zeszyt 3/2011.
- [3] Kamionka L.: Architect by Way of Creation as Well Coordinator Tral Draw of Sustainable Architecture – Synergy Design. Architekt jako kreator i koordynator procesu projektowania architektury zrównoważonej – synergia projektowa. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Instytutu Projektowania Architektonicznego: Defining The Architectural Space. Architecture Now. Kraków, 19-20.XI.2010, Czasopismo Techniczne, t. II.
- [4] Kamionka L.: *Architektura zrównoważona i jej standardy na przykładzie wybranych metod oceny*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Monografie, studia, rozprawy M30, Kielce 2012.
- [5] Kamionka L.: *Standardy architektury zrównoważonej jako istotny czynnik miasta oszczędnego na przykładzie wybranych programów certyfikacyjnych*. Ogólnopolska Konferencja Naukowa Instytutu Projektowania Urbanistycznego, Miasto Oszczędne. Kraków 28-29.05.2010, Czasopismo Techniczne, t. II. Politechnika Krakowska, praca zbiorowa pod redakcją S. Wehle-Strzeleckiej.
- [6] Konferencja Naukowo-Techniczna „Energoozczędne budownictwo mieszkaniowe” – Mrągowo, 2001; Richter E., Nowak K., Krauze H., Nowak H.A.: *Modernizacja budynków mieszkalnych w Niemczech*. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2001.
- [7] Rezolucja legislacyjna Parlamentu Europejskiego w sprawie zmienionej strategii zrównoważonego rozwoju. Dz.Urz. UE 300E P6 TA (2006/0272 z dnia 15.06.2006).

MAREK IWAŃSKI¹
MAŁGORZATA CHOLEWIŃSKA²
ALEKSANDRA GORECZNA³

Kielce University of Technology

¹ e-mail: iwanski@tu.kielce.pl

² e-mail: m.cholewinska@tu.kielce.pl

³ e-mail: a.boszczyk@tu.kielce.pl

INFLUENCE OF AGING ON THE PROPERTIES OF F-T WAX MODIFIED ROADWAY BITUMEN

WPŁYW STARZENIA NA WŁAŚCIWOŚCI ASFALTÓW DROGOWYCH MODYFIKOWANYCH WOSKIEM SYNTETYCZNYM F-T

Abstract

This study aimed at evaluating the impact of short-term and long-term aging on the properties of road bitumen modified with low-viscosity agents. Two types of road bitumen were used as reference binders: 35/50 and PMB 45/80-65. The modifier, Fischer-Tropsch synthetic wax, was added in 1.5%, 2.0%, 2.5% and 3% increments. The testing programme included the indication of the penetration at 25 °C, the Ring and Ball Softening Point and the Fraass Breaking Point. These properties were determined in three phases: prior to aging, after the bitumen had been aged in the short-term aging test, RTFOT, and after the bitumen had been aged in the long-term aging test, PAV. Modification of the bitumen made it stiffer thus increasing the resistance of the bituminous mixture to permanent deformation. The results show that both short-term and long-term aging contributed to increased hardness and brittleness of the binder.

Keywords: synthetic wax, short-term aging, long-term aging, RTFOT, PAV.

Streszczenie

Przedmiotem badań i analiz przedstawionych w publikacji jest ocena wpływu starzenia krótko- i długoterminowego na właściwości asfaltów drogowych modyfikowanych środkiem niskowiskozowym. Jako lepszycza referencyjne wykorzystano dwa asfalty drogowe: 35/50 oraz PMB 45/80-65. Modyfikator w postaci wosku syntetycznego Fischera-Tropscha dodawano w ilości 1,5%, 2,0%, 2,5% oraz 3%. Zakres badań obejmował: penetrację w temperaturze 25 °C, temperaturę mięknięcia według metody „pierścień i kula” oraz temperaturę łamliwości według Fraassa. Na podstawie powyższych parametrów obliczono wartość indeksu penetracji IP oraz temperaturowy zakres plastyczności TZP. Wszystkie właściwości określono w trzech etapach: przed starzeniem, po starzeniu krótkoterminowym według metody RTFOT oraz po starzeniu długoterminowym według metody PAV. Modyfikacja asfaltu woskiem syntetycznym spowodowała usztywnienie lepszycza, tym samym zwiększając odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe. Uzyskane wyniki badań pokazują, że zarówno starzenie krótko-, jak i długoterminowe spowodowało zwiększenie twardości i kruchości lepszycza.

Słowa kluczowe: wosk syntetyczny, starzenie krótkoterminowe, starzenie długoterminowe, RTFOT, PAV.

1. Introduction

Dynamic development of road infrastructure calls for the design and implementation of technologies that will minimize environmental effects of technology processes. The reduction in bitumen fumes during HMA (Hot Mix Asphalt) production

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój infrastruktury drogowej determinuje konieczność wdrażania technologii mających na celu minimalizowanie skutków oddziaływania procesów technologicznych na środowisko. Istotnym jest zmniejszenie emisji szkodliwych substan-

and placement is a good case in point. As the reduced production phase temperature significantly decreases energy consumption, the recently introduced technologies allow the producers to lower (approximately 20-40°C than HMA [1]) the temperatures at which bituminous mixtures are mixed, placed and compacted while maintaining identical physical and mechanical properties [2]. These technologies are known as WMA (Warm Mix Asphalt).

The technology involves increasing the workability of the mix by heating its components to the temperature considerably lower than that used in conventional technologies. This effect can be obtained by:

- adding viscosity-lowering agents, such as Sasobit, Asphaltan B, Cace BASE RT, Zeolit, to the binder;
- foaming in the presence of water [3].

The use of modified binders has a direct influence on the improvement of bituminous mixture characteristics by generating higher resistance to permanent deformation and increasing fatigue life [4]. Additionally, in case of modification of the binder with synthetic wax the stiffness modulus increases and the phase angle decreases, which will result in better stress distribution in the roadway construction made of MMA and lower tensile strains in the bottom of the bitumen layers. Durability of road pavements is greatly dependent on aging processes, which lower the values of bitumen physical (e.g. adhesion bitumen to aggregate) and rheological (e.g. bitumen viscosity) parameters [5, 6]. Lower bitumen parameters lead to the lower quality of the bituminous layer and pavement structure [7].

The progress of oxidation-related changes in the composition and structure of the bitumen over time, resulting in its hardening and brittleness, is called aging [8]. The aging of bitumen binders can be divided in two phases [9]:

- short-term aging, which occurs during mixing, storage and laying processes. A thin film of the bitumen that covers the aggregate grains is subjected to a short-term action of high temperature (about 160-180°C) and oxygen molecules from the air. As a result, oil fractions evaporate and bitumen compounds oxidise;
- long-term aging, which occurs during service life of the pavement, is mostly dependent on weather conditions (i.e. reaction of binder components with oxygen – oxidation of bitumen and absorption of infrared radiation) and such

cji uwalnianych podczas produkcji oraz wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej wytwarzanej w wysokich temperaturach w technologii na gorąco – HMA. Dlatego też w ostatnich latach zaczęto wdrażać technologie umożliwiające wytworzenie, wbudowanie i zagęszczenie mieszanki w temperaturze niższej nawet o 20-40°C niż HMA [1], przy zachowaniu identycznych parametrów fizykomechanicznych [2]. Są to tak zwane technologie na ciepło – WMA.

Zasada ich produkcji polega na uzyskaniu odpowiedniej urabialności mieszanki, podgrzewając jej składniki do znacznie niższej temperatury otoczenia niż w dotychczas stosowanych technologiach. Efekt ten możemy uzyskać poprzez:

- dodanie do lepiszcza środków obniżających lepkość asfaltu, tj.: Sasobit, Asphaltan B, Cace BASE RT, Zeolit,
- uzyskanie spienienia asfaltu w obecności wody [3].

Stosowanie lepiszczy modyfikowanych polimerami wpływa na poprawę właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, zwiększając odporność na odkształcenia trwałe oraz ich trwałość zmęczeniową [4]. Dodatkowo w przypadku modyfikacji lepiszcza woskiem syntetycznym obserwuje się wzrost modułu sztywności i zmniejszenie kąta przesunięcia fazowego, co będzie przekładać się na lepszy rozkład naprężeń w konstrukcji jezdni wykonanej z MMA oraz mniejsze odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych. Trwałość nawierzchni asfaltowych w dużym stopniu zależy także od przebiegu procesów starzeniowych, w trakcie których następuje obniżenie wartości parametrów fizykochemicznych (m.in. adhezji asfaltu do kruszywa) i reologicznych asfaltu (m.in. lepkości lepiszcza) [5, 6]. Skutkuje to obniżeniem jakości wykonywanej warstwy asfaltowej i konstrukcji nawierzchni [7].

Postępujące zmiany na skutek utleniania asfaltu, jakie zachodzą w składzie i strukturze asfaltu w czasie, prowadząc do zwiększenia jego twardości i kruchości, nazywamy starzeniem [8]. Starzenie lepiszczy asfaltowych można podzielić na dwa zasadnicze etapy [9]:

- starzenie technologiczne (krótkoterminowe), które obejmuje proces magazynowania, produkcji oraz wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej. Zachodzi ono szczególnie podczas produkcji, wówczas gdy cienka warstwa asfaltu znajdująca się na ziarnach kruszywa poddawana jest krótkotrwałemu działaniu wysokiej temperatury (ok. 160-180°C) i tlenu z powietrza. Następuje wtedy odparowanie frakcji olejowych i szybkie utlenianie związków asfaltu;
- starzenie eksploatacyjne (długoterminowe) obejmujące okres eksploatacji nawierzchni, na który

factors as water, chemical de-icing agents and precipitation-related pollutants. This process changes the properties of the binder and bituminous mixture gradually and slowly [8, 10, 11, 12].

This paper presents the results of the laboratory tests performed by the authors on F-T synthetic wax modified road bitumen, 35/50 and PMB 45/80-65, short-term aged according to the RTFOT and long-term aged according to the PAV test.

2. Materials

Two types of common road bitumen were used in the tests to produce low-temperature binders: bitumen 35/50 (to the binder course and the base course) and polymer-modified bitumen PMB 45/80-65 (to surface course). The amount of the binder was sufficient to perform all laboratory tests. The choice of the bitumen was such that the balance between the aging rate of the reference bitumen and the changes occurring in the modifiers during aging could be attained [13]. Due to the fact that both bitumens are characterized by high levels of asphaltene, the interaction between the bitumen conversion reactions and the modifier additive will be small. In addition, every change of the amount of modifier will cause a relatively rapid change in tested bitumen properties [13].

Synthetic wax (granulated) obtained from the Fischer-Tropsch synthesis reaction was used as a modifier. This specific wax differs from natural paraffin waxes and thus affects the neat bitumen in a different way. This is because hydrocarbon chains in the synthetic wax have 40 to 100 carbon atoms [14, 15]. In view of the high melting temperature (about 98°C), synthetic wax has an effect on bitumen rheological properties and increases its dynamic viscosity at less than 100°C. Above 100°C, the Fischer-Tropsch synthetic wax considerably reduces bitumen viscosity thus making it possible to reduce the temperature of bituminous mixture compaction by about 20-30°C [3].

3. Methods

Two types of road bitumen, 35/50 and PMB 45/80-65, were modified with 1.5% to 3.0% F-T synthetic wax added with a step of 0.5%. Preparation of the test material involved making 800 g bitumen samples for each wax content value. The samples were heated to at least 145°C depending on the predicted softening temperature with the specified modifier content. The temperature was maintained for 30 min after which

wpływ mają przede wszystkim warunki klimatyczne (tzn. reakcja składników asfaltu z tlenem – utlenianie asfaltu oraz absorpcja promieniowania podczerwonego), jak i oddziaływanie czynników z otoczenia, takich jak: woda i środki chemiczne używane do odładzania dróg. Proces ten przebiega powoli, z małą intensywnością [8, 10, 11, 12].

W opracowaniu zostały przedstawione wyniki własnych badań laboratoryjnych wykonanych na asfaltach 35/50 i PMB 45/80-65, zmodyfikowanych woskiem syntetycznym Fischera-Tropscha, poddanych starzeniu technologicznemu wg metody RTFOT oraz starzeniu eksploatacyjnemu wg metody PAV.

2. Materiały

W badaniach jako materiały wyjściowe użyto dwóch powszechnie stosowanych w drogownictwie rodzajów asfaltów: 35/50 (do warstwy wiążącej i podbudowy) oraz asfalt modyfikowany polimerami PMB 45/80-65 (do warstwy ścieralnej). Zmagazynowana ilość lepiszcza pozwoliła na wykonanie wszystkich badań laboratoryjnych. Wybór asfaltu związany był z uzyskaniem balansu pomiędzy tempem starzenia asfaltu referencyjnego oraz zmianami zachodzącymi w trakcie starzenia w dodawanych modyfikatorach [13]. Z faktu, że oba asfalty odznaczają się dużą ilością asfaltenów, to interakcja pomiędzy reakcjami konwersji w asfalcie i dodanym modyfikatorem będzie mała. Ponadto każda zmiana ilości modyfikatora wywoła stosunkowo szybką zmianę w trakcie oznaczenia danej cechy asfaltu [13].

Jako modyfikator zastosowano wosk syntetyczny (w postaci granulatu) uzyskiwany w procesie syntezy Fischera-Tropscha. Wosk ten charakteryzuje się specyficzną budową różniącą się od naturalnych wosków parafinowych, w związku z czym odmiennie oddziałuje na asfalt bazowy. Dzieje się tak, ponieważ łańcuchy węglowodorowe zawarte w wosku syntetycznym posiadają od około 40 do 100 atomów węgla [14, 15]. Wosk F-T ze względu na wysoką temperaturę topnienia (około 98°C), w temperaturze poniżej 100°C wpływa na właściwości reologiczne asfaltu, a także zwiększa jego lepkość dynamiczną. Natomiast w temperaturze powyżej 100°C znacząco obniża lepkość asfaltu, przez co daje sposobność obniżenia temperatury zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej o ok. 20-30°C [3].

3. Metodyka badawcza

Asfalty drogowe 35/50 oraz PMB 45/80-65 poddano modyfikacji woskiem Fischera-Tropscha w ilości od 1,5% do 3,0%, z krokiem co 0,5%. Przygotowanie materiału badawczego obejmowało wydzielenie próbek asfaltu w ilości 800 g dla każdej zawartości

the bitumen was mixed with the modifier in a mixer at 300 rpm and at constant temperature. Having obtained homogeneity, the samples were assessed in terms of quality according to EN 12594.

To evaluate the effect of the modifier on the properties of the bitumens, 35/50 and PMB 45/80-65, after the aging process the following parameters were determined:

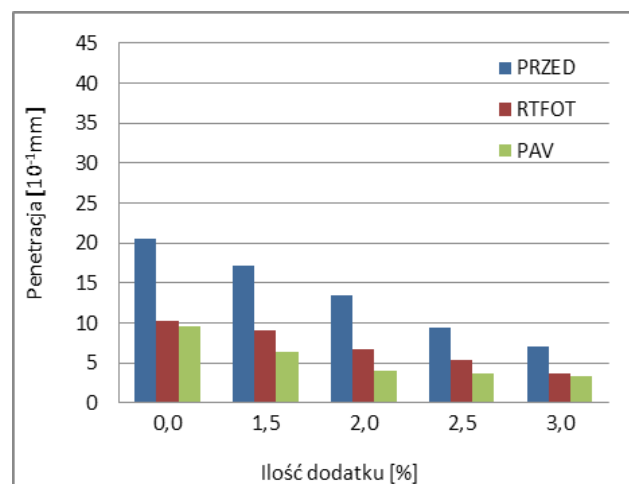
- penetration at 25°C to PN-EN 1426,
- Softening Point (Ring-and-Ball apparatus) to PN-EN 1427,
- Fraass Breaking Point to PN-EN 12593.

The rheological properties of the binders used were determined in three phases. The first phase involved the evaluation of the unaged material. In the second phase, short-term aged binders were evaluated and in the third phase the binders subjected to both short-term and long-term aging were evaluated.

The rolling thin film oven test (RTFOT) was applied to simulate short-term aging. The test was performed according to EN 12607-1. Long-term aging was achieved using the Pressure Ageing Vessel (PAV) according to the norm PN-EN 14769.

4. Results

The value of the first parameter, penetration, is expressed as the distance the needle penetrates the bitumen sample under a load of 100 g, at a temperature of 25°C for 5 seconds [8]. The test measures consistency of binders [16]. The results for penetration of the F-T wax modified bitumens after short-term and long-term aging are shown in Figures 1 and 2.



wosku. Następnie próbki podgrzano do temperatury co najmniej 145°C, w zależności od przewidywanej temperatury mięknięcia z określoną zawartością modyfikatora. Temperatura utrzymywana była przez 30 minut, po czym wymieszano asfalt z modyfikatorem w blenderze przy 300 obr/min, zachowując stałą temperaturę. Po uzyskaniu jednorodności wykonano ocenę jakości przygotowanych próbek zgodnie z EN 12594.

W celu określenia wpływu modyfikatora na właściwości asfaltu 35/50 i PMB 45/80-65 po procesie starzenia zrealizowano podstawowe badania, w zakres których wchodziły:

- penetracja w temperaturze 25°C, zgodnie z PN-EN 1426,
- temperatura mięknięcia według metody „pierścień i kula”, zgodnie z PN-EN 1427,
- temperatura łamliwości według metody Fraassa, zgodnie z PN-EN 12593.

Właściwości reologiczne użytych asfaltów określono w trzech etapach: pierwszy dotyczył oceny materiału niepoddanego procesom starzenia, w drugim oceniono lepiscza po uprzednim starzeniu technologicznym, trzeci zaś obejmował lepiscza poddane wcześniej starzeniu technologicznemu i eksploatacyjnemu.

W celu dokonania symulacji starzenia technologicznego (krótkoterminowego) w warunkach laboratoryjnych zastosowano metodę RTFOT. Badanie zostało wykonane według PN-EN 12607-1. Proces starzenia eksploatacyjnego przebiegał z użyciem urządzenia PAV zgodnie z normą PN-EN 14769.

4. Wyniki badań

Pierwszym poddanym analizie parametrem jest penetracja. Jest to miara konsystencji asfaltu [16]. Wyrażona jest jako głębokość na jaką zanurza się w asfalcie igła penetracyjna pod obciążeniem 100 g, w temperaturze 25°C, w ciągu 5 sekund [8]. Wyniki oznaczenia penetracji asfaltów modyfikowanych woskiem F-T po procesie starzenia krótko- i długoterminowego przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

Fig. 1. Penetration for F-T wax-modified bitumen 35/50
Rys. 1. Penetracja asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

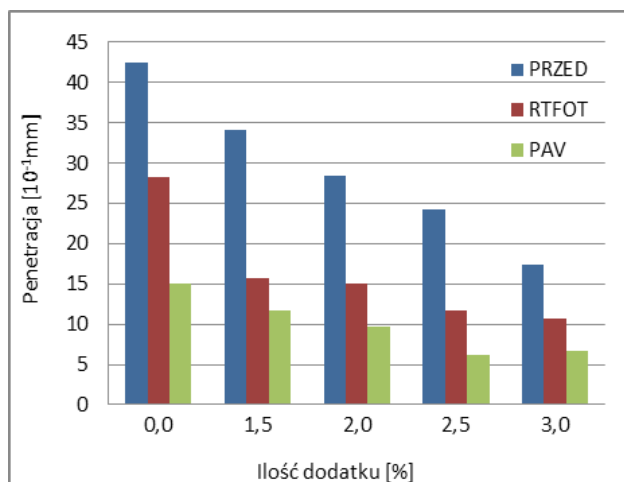


Fig. 2. Penetration for F-T wax-modified bitumen PMB 45/80-65

Rys. 2. Penetracja asfaltu PMB 45/80-65 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

Analysis of the results indicates that the increased content of the synthetic wax has a significant effect on the lowering of the penetration value in both bitumen types. Aging leads to an increase in bitumen stiffness irrespective of the wax content and reference binder type (bitumen 35/50 or bitumen PMB 45/80-65). On the basis of the research it can also be stated that the decrease in penetration is much higher after the technological aging process RTFOT than after the aging of the PAV. The test results also show that the reduction in penetration grade is higher after the short-term aging and in PMB 45/80-65 than in bitumen 35/50.

To provide additional interpretation of the properties of the bitumens discussed in this paper, the test results were analyzed using a multivariate analysis of variance. Three factors were chosen: amount of the modifier (amount), aging phase (aging) and the interaction between the modifier amount and the aging phase (amount · aging). The result of the analysis were: Sum of Squares (SS), Mean Square Error (MS), variance analysis result (F) and probability (p-value). Tables 1 and 2 present the significance of the effect of the factors above on the level of penetration.

Factor	Penetration [10 ⁻¹ mm] SS	Penetration [10 ⁻¹ mm] MS	Penetration [10 ⁻¹ mm] F	Penetration [10 ⁻¹ mm] p-value
amount	569.39	142.35	147.231	<0.000001
aging	704.85	352.43	364.516	<0.000001
amount · aging	116.23	14.53	15.028	<0.000001
error	43.51	0.97		

Analiza wyników badań pozwala stwierdzić, że wzrost zawartości wosku syntetycznego, w przypadku obu asfaltów, wpływa istotnie na obniżenie penetracji. Niezależnie od ilości wosku syntetycznego i rodzaju lepiszcza referencyjnego (asfalt 35/50 lub PMB 45/80-65) starzenie powoduje zwiększenie poziomu sztywności asfaltu. Na podstawie badań można także stwierdzić, że spadek penetracji jest znacznie większy po procesie starzenia technologicznego RTFOT niż po starzeniu eksploatacyjnym PAV. W przypadku asfaltu PMB 45/80-65 odnotowano większe spadki wartości penetracji niż w przypadku asfaltu 35/50.

W celu dodatkowej oceny zmian właściwości asfaltów omawianych w niniejszym opracowaniu wyniki poddano wieloczynnikowej analizie wariancji. Do analizy wyodrębniono trzy czynniki: ilość modyfikatora (ilość), etap starzenia (starzenie) oraz interakcję pomiędzy ilością modyfikatora i etapem starzenia (ilość · starzenie). W wyniku analizy otrzymano: sumę kwadratów efektów (SS), średni błąd kwadratowy (MS), wynik analizy wariancji (F) oraz prawdopodobieństwo testowe (p-wartość). Wyniki istotności wpływu rozważanych czynników na poziom cechy penetracja przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Table 1. Multivariate analysis of variance for penetration, bitumen 35/50

Tabela 1. Wieloczynnikowa analiza wariancji cechy penetracja dla asfaltu 35/50

Factor	Penetration [10 ⁻¹ mm] SS	Penetration [10 ⁻¹ mm] MS	Penetration [10 ⁻¹ mm] F	Penetration [10 ⁻¹ mm] p-value
amount	2070.2	517.56	1104.319	<0.000001
aging	3928.2	1964.09	4190.807	<0.000001
amount · aging	374.1	46.76	99.775	<0.000001
error	21.1	0.47		

This analysis revealed a significant effect on the penetration variation level with respect to both bitumens. With a 0.05 significance level, the penetration value was shown to be significantly affected by both the amount of modifier (p-value < 0.000001) and the aging phase (p-value < 0.000001). Also the interaction between the factors was found to have a significant effect on the dependent variable (penetration change), which indicates that the combined action of both factors has a different effect than that caused by each factor alone [13]. The greatest proportion of variance, relative to the mean squared error (MS), was explained by the aging phase for both bitumen types, especially for PMB (MS = 1964.09).

Another parameter under investigation was the softening point, which is an approximate limit at which bitumen changes from viscoelastic state to viscous form. The test involves removing binder layers by a ball under certain measurement conditions [5]. Figures 3 and 4 show the results from the softening point tests of the modified bitumens.

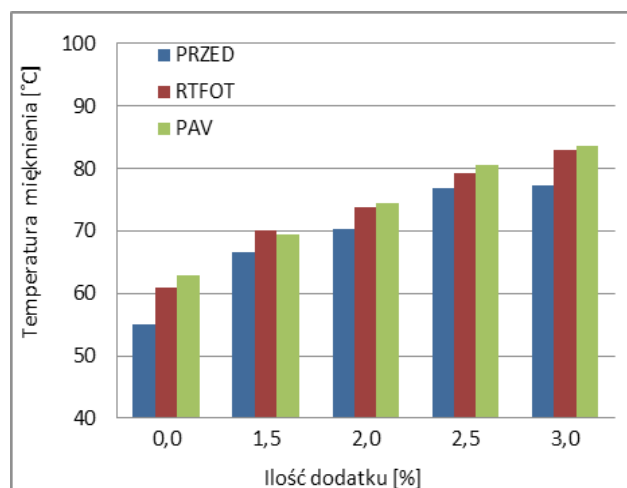


Table 2. Multivariate analysis of variance for penetration, bitumen PMB 45/80-65

Tabela 2. Wieloczynnikowa analiza wariancji cechy penetracja dla asfaltu PMB 45/80-65

Rezultaty analizy wariancji wieloczynnikowej wskazują na istotny wpływ na poziom zmienności cechy penetracja w odniesieniu do obydwu asfaltów. Wyniki na poziomie istotności wynoszącym 0,05 ujawiły duży wpływ ilości modyfikatora (p-wartość < 0,000001), jak i etapu starzenia (p-wartość < 0,000001). Również istotna okazała się interakcja pomiędzy zadanymi czynnikami na zmienną zależną (zmiana penetracji), co wskazuje, że działanie obu czynników wywołuje odmienny efekt niż gdyby oba oddziaływały oddzielnie [13]. Największy udział w wyjaśnieniu zmienności względem średniego błędu kwadratowego (MS), w przypadku obu asfaltów miał etap starzenia, szczególnie dla asfaltu PMB (MS = 1964,09).

Następnym rozważanym parametrem jest temperatura mięknięcia. Jest to umowna granica przejścia asfaltu ze stanu lepkosprężystego w stan lepki. Badanie to polega na ścinaniu warstwy asfaltu przez kulę w określonych warunkach pomiaru [5]. Wyniki oznaczenia temperatury mięknięcia asfaltów modyfikowanych przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Fig. 3. Softening point for F-T wax-modified bitumen 35/50

Rys. 3. Temperatura mięknięcia asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

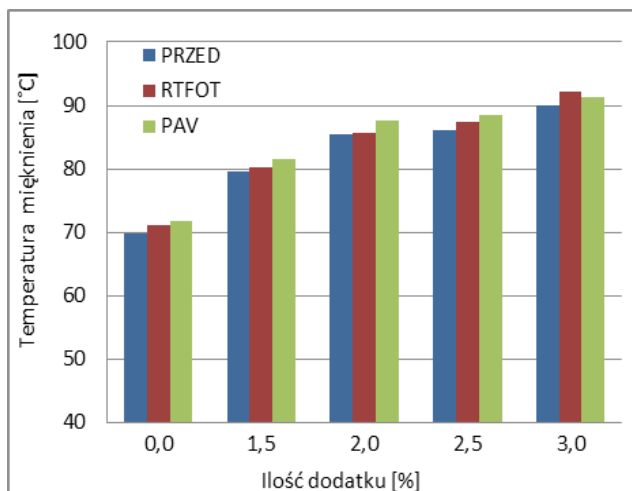


Fig. 4. Softening point for F-T wax-modified bitumen PMB 45/80-65

Rys. 4. Temperatura mięknienia asfaltu PMB 45/80-65 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

The results indicate that the use of a modifier, which in this case is F-T wax, increases the softening temperature. The most favourable values of this parameter were recorded after short-term and long-term aging. The highest increase of the softening temperature after RTFOT aging was recorded for the unmodified bitumen 35/50 and with 3% F-T wax content (nearly 6°C). The other 35/50 bitumens showed T_{PIK} increase in the range 3°C to 4°C. The increase in softening temperature for the modified PMB 45/80-65 ranged from 0.5°C to 2.5°C. After PAV aging, small changes in the softening temperature were recorded. They ranged from 0.5°C to 2°C for both bitumen types.

Tables 3 and 4 summarize the results from the significance evaluation of the effect of the factors on the level of the softening point.

Factor	T_{PIK} [°C]	T_{PIK} [°C]	T_{PIK} [°C]	T_{PIK} [°C]
	SS	MS	F	p-value
amount	3579.3	894.84	2408.728	<0.000001
aging	295.7	147.84	397.953	<0.000001
amount · aging	43.0	5.38	14.485	<0.000001
error	16.7	0.37		

Table 3. Multivariate analysis of variance for softening point, bitumen 35/50

Tabela 3. Wieloczynnikowa analiza wariancji cechy temperatura mięknienia dla asfaltu 35/50

Factor	T_{PIK} [°C]	T_{PIK} [°C]	T_{PIK} [°C]	T_{PIK} [°C]
	SS	MS	F	p-value
amount	2964.07	741.02	1837.8582	<0.000001
aging	33.62	16.18	41.6925	<0.000001
amount · aging	10.85	1.36	3.3626	0.004203
error	18.14	0.40		

Table 4. Multivariate analysis of variance for softening point, bitumen PMB 45/80-65

Tabela 4. Wieloczynnikowa analiza wariancji cechy temperatura mięknienia dla asfaltu PMB 45/80-65

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że zastosowanie wosku F-T powoduje wzrost temperatury mięknienia. Najkorzystniejsze wartości tego parametru odnotowano po procesie starzenia technologicznego i eksploatacyjnego. Największy wzrost temperatury mięknienia po starzeniu RTFOT wykazał asfalt 35/50 bez dodatku wosku F-T oraz z 3% jego zawartością (prawie 6°C). Pozostałe badane asfalty 35/50 wykazały wzrost T_{PIK} w granicach od 3°C do 4°C. Modyfikowany asfalt PMB 45/80-65 charakteryzował się także wzrostem temperatury mięknienia, ale w granicach od 0,5°C do 2,5°C. Po starzeniu PAV dla obu asfaltów zanotowano małe zmiany tego parametru – w granicach 0,5°C do 2°C.

Wyniki oceny istotności wpływu rozważanych czynników na poziom cechy temperatura mięknienia przedstawiono w tabelach 3 i 4.

All the factors significantly affected the softening point (p -value < 0.05) as was the case with the penetration value. The greatest proportion of variance, relative to the mean squared error (MS), was explained by the amount of the modifier for both bitumen types (bitumen 35/50 – MS = 894.84, bitumen PMB – MS = 741.02).

The last parameter under investigation was the Fraass breaking point. The Fraass breaking point is the temperature at which a binder layer placed on a steel plate, cooled at a fixed speed of $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, cracks or fractures after bending [8].

W przypadku temperatury mięknięcia, podobnie jak w przypadku analizy penetracji, wszystkie czynniki wpłynęły istotnie na zmiany tego parametru (p -wartość $< 0,05$). Największy udział w wyjaśnieniu zmienności względem średniego błędu kwadratowego (MS), w przypadku obu asfaltów, miała ilość modyfikatora (asfalt 35/50 – MS = 894,84, asfalt PMB – MS = 741,02).

Ostatnim rozważanym parametrem jest temperatura łamliwości według Fraassa. Jest to najniższa temperatura, w której warstwa asfaltu nałożona na płytkę stalową, oziębiana ze stałą prędkością $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, zarysuj się lub pęknie po jej zgięciu [8].

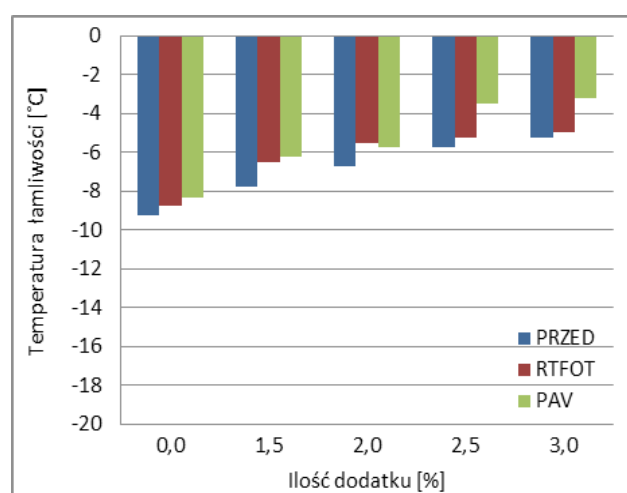


Fig. 5. Fraass temperature for F-T wax-modified bitumen 35/50

Rys. 5. Temperatura łamliwości asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

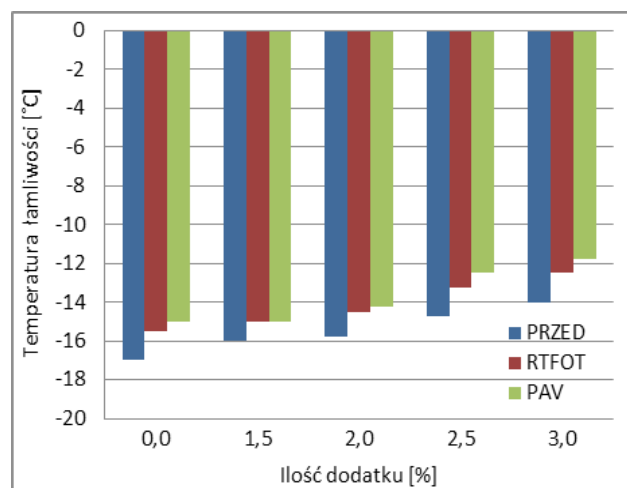


Fig. 6. Fraass temperature for F-T wax-modified bitumen PMB 45/80-65

Rys. 6. Temperatura łamliwości asfaltu PMB 45/80-65 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

The breaking point results summarized in Figures 5 and 6 indicate that the breaking point temperature increases with an increase in the F-T wax content (at 3% of additive percentage the drop in breaking point was approx. $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$). After the RTFOT and PAV aging, the breaking point of the bitumens is additionally increased compared with the unaged binders. After

Rezultaty badań temperatury łamliwości przedstawione na rysunkach 5 i 6 wykazały, że wartość temperatury łamliwości rośnie wraz ze wzrostem ilości dodatku wosku F-T (przy 3% jego udziale w asfalcie spadek temperatury łamliwości wynosi ok. $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$). Po starzeniu RTFOT i PAV wszystkie badane asfalty charakteryzują się dodatkowym wzrostem tempera-

the RTFOT aging, the breaking temperature of the binders was 1-2°C higher compared with the unaged binder. In most bitumens, the PAV aging caused further increase in this temperature. After the full aging process, however, the breaking point increase was small and did not exceed 2.25°C in comparison with the pre-aging temperature. This suggests that after the aging process, the resistance of the F-T modified binders to low temperatures will be slightly lower. Therefore, it can be assumed that the aging process is not as significant as in this case of the addition of synthetic wax F-T.

Tables 5 and 6 show the outcome of the multivariate analysis of variance for the breaking temperature.

Factor	T _{FRAASS} [°C] SS	T _{FRAASS} [°C] MS	T _{FRAASS} [°C] F	T _{FRAASS} [°C] p-value
amount	141.429	35.357	104.814	<0.000001
aging	23.721	11.861	35.160	<0.000001
amount · aging	7.419	0.927	2.749	0.014650
error	15.180	0.337		

Factor	T _{FRAASS} [°C] SS	T _{FRAASS} [°C] MS	T _{FRAASS} [°C] F	T _{FRAASS} [°C] p-value
amount	79.60	19.90	34.7767	<0.000001
aging	35.10	17.55	30.6699	<0.000001
amount · aging	2.40	0.30	0.5243	0.831900
error	25.75	0.57		

From the multivariate analysis of variance it follows that in the case of bitumen 35/50, all factors had a significant effect on the variability of the breaking point. The analysis conducted for bitumen PMB 45/80-65 reveals that only the interaction between the modifier amount and the aging phase is not statistically significant with the confidence level above 0.05 (p-value = 0.83). The proportion of variance explained relative to the mean squared error (MS) for both bitumens was comparable for all the factors except their interaction [13].

The values of the penetration index PI and temperature plasticity range TPR were calculated based on the results obtained for penetration at 25°C, softening point and breaking point, using the formulas [17]:

temperatury łamliwości w porównaniu do lepszycy niepoddanych starzeniu. Po starzeniu RTFOT charakteryzują się one podwyższoną temperaturą łamliwości o 1÷2°C, w porównaniu do lepszycy niestarzonego. W większości badanych asfaltów starzenie PAV spowodowało dalszy wzrost tej temperatury. Jednakże po pełnym procesie starzenia wzrost wartości badanego parametru był niewielki i nie przekroczył w żadnym przypadku 2,25°C w odniesieniu do stanu przed starzeniem. W związku z tym można przyjąć, że proces starzenia nie jest w tym przypadku tak znaczący jak sam dodatek wosku syntetycznego F-T.

Wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji dla cechy temperatura łamliwości przedstawiono w tabelach 5 i 6.

Table 5. Multivariate analysis of variance for breaking temperature, bitumen 35/50

Tabela 5. Wieloczynnikowa analiza wariancji cechy temperatura łamliwości dla asfaltu 35/50

Table 6. Multivariate analysis of variance for breaking temperature, bitumen PMB 45/80-65

Tabela 6. Wieloczynnikowa analiza wariancji cechy temperatura łamliwości dla asfaltu PMB 45/80-65

W odniesieniu do temperatury łamliwości, w przypadku wieloczynnikowej analizy wariancji dla asfaltu 35/50, wszystkie czynniki miały istotny wpływ na poziom zmienności tej cechy. Dla asfaltu PMB 45/80-65 stwierdzono, że jedynie efekt interakcji pomiędzy ilością modyfikatora a etapem starzenia nie jest istotny statystycznie ze względu na poziom ufności powyżej 0,05 (p-wartość = 0,83). Udział w wyjaśnieniu zmienności względem średniego błędu kwadratowego (MS), w obu asfaltach był porównywalny dla wszystkich czynników poza interakcją pomiędzy nimi [13].

Na podstawie wyników oznaczenia penetracji w 25°C, temperatury mięknięcia oraz temperatury łamliwości obliczono wartość indeksu penetracji IP oraz temperaturowy zakres plastyczności TZP, korzystając z wzorów [17]:

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

where: T_{PiK} – softening point, °C;
 P – penetration at 25°C, 0,1 mm.

$$TZP = T_{PiK} - T_{FRAASS} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

where: T_{PiK} – softening point according to PiK, °C;
 T_{FRAASS} – Fraass breaking temperature, °C.

Figures 7-10 show the results for the penetration index and the temperature plasticity range, computed based on formulas (1) and (2) for F-T modified bitumens before and after short-term and long-term aging.

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

gdzie: T_{PiK} – według metody „pierścień i kula, °C;
 P – penetracja w 25°C, 0,1 mm.

$$TZP = T_{PiK} - T_{FRAASS} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

gdzie: T_{PiK} – temperatura mięknięcia wg metody „pierścień i kula, °C; T_{FRAASS} – temperatura łamliwości wg metody Fraassa, °C.

Wyniki obliczonych według wzorów (1) i (2) wartości indeksu penetracji oraz temperaturowego zakresu plastyczności asfaltów z dodatkiem wosku F-T przed starzeniem i po starzeniu krótko- i długoterminowym przedstawiono na rysunkach 7-10.

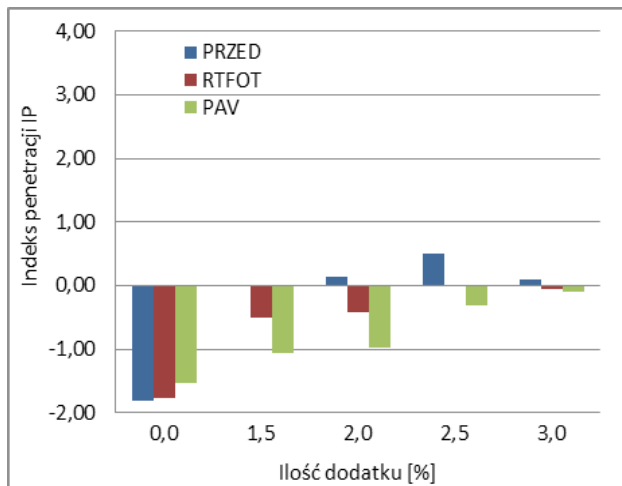


Fig. 7. Penetration index of F-T wax-modified bitumen 35/50

Rys. 7. Indeks penetracji asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

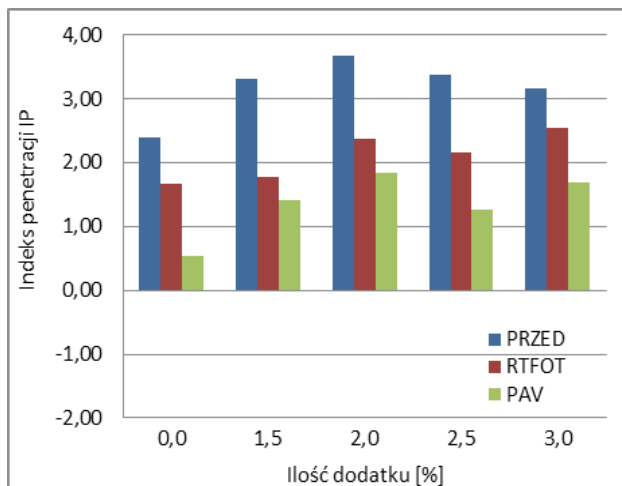


Fig. 8. Penetration index of F-T wax-modified bitumen PMB 45/80-65

Rys. 8. Indeks penetracji asfaltu PMB 45/80-65 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

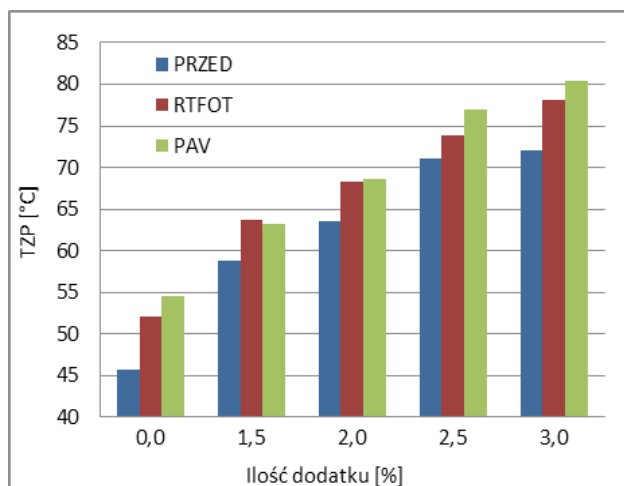


Fig. 9. Temperature plasticity range of F-T wax-modified bitumen 35/50

Rys. 9. Temperaturowy zakres plastyczności asfaltu 35/50 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

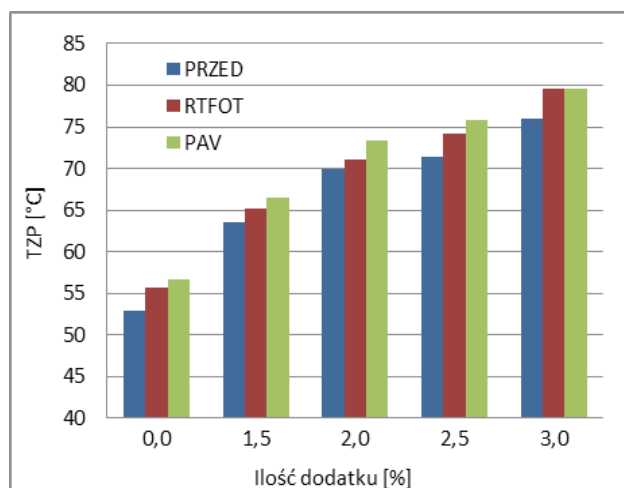


Fig. 10. Temperature plasticity range of F-T wax-modified bitumen PMB 45/80-65

Rys. 10. Temperaturowy zakres plastyczności asfaltu PMB 45/80-65 modyfikowanego woskiem syntetycznym F-T

Analysis of the test results revealed a marked difference between the values obtained for the penetration index of bitumens 35/50 and PMB 45/80-65. It is clear that the modifier added, F-T wax, contributes to the increase in the penetration index in both bitumen types. As a result of aging, all the modified bitumens had lower PI values, which is not favourable because the consistency of the binder changes faster with temperature, i.e., it has higher temperature susceptibility. But bitumens 35/50 modified with F-T synthetic wax have the PI > -1.0 after long-term aging with the plasticity range above 60°C and thereby they can be used as binders in the production of bituminous mixtures intended for structural layers of road pavements. In bitumens PMB 45/80-65 modified with F-T synthetic wax, aging led to a change of their rheological properties from gel to sol-gel type. Nonetheless, unlike the bitumens with negative PI values, these bitumens have positive penetration indices thus being more suitable for road pavements owing to their viscosity

Analizując wyniki badań, zaobserwowano wyraźną różnicę między otrzymanymi wartościami indeksu penetracji w przypadku asfaltów 35/50 oraz PMB 45/80-65. Należy stwierdzić, że w przypadku obu asfaltów wosk F-T przyczynia się do wzrostu wartości indeksu penetracji. W wyniku starzenia wszystkie modyfikowane asfalty wykazały spadek wartości IP, co nie jest korzystne, gdyż lepszycze takie szybciej zmienia swoją konsystencję wraz ze zmianami temperatury, czyli charakteryzuje się większą wrażliwością termiczną. Jednakże asfalty 35/50 modyfikowane woskiem F-T po starzeniu eksploatacyjnym charakteryzują się IP > -1,0, tym samym ich TZP wynosi powyżej 60°C i jak najbardziej mogą być wykorzystywane jako lepszycze do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych. W przypadku asfaltów PMB 45/80-65 modyfikowanych woskiem F-T starzenie spowodowało zmianę postaci reologicznej asfaltów z typu żel na zol-żel. Mimo to nadal są to asfalty o dodatnich IP i są bardziej przydatne do pracy w nawierzchni drogowej niż asfalty o ujemnych IP,

levels at low temperatures and short time of loading and because they do not flow at temperatures above zero and under long time of loading.

Temperature plasticity range is dependent on the penetration index value. For all modifications investigated, both before and after short-term and long-term aging, extended plasticity range was recorded, which indicates an increase in the range of temperatures at which the binder retains its viscoelastic properties.

5. Conclusions

From the results presented in this paper, the following conclusions can be drawn:

- Fischer-Tropsch wax added to the binder increases its stiffness which is manifested by the drop in penetration value and the rise in softening point and breaking temperature, regardless of the bitumen type and modifier amount used;
- the amount of modifier added as well as the aging phase had a significant effect on the variability of the parameters studied;
- short-term and long-term aging result in changes in rheological properties of F-T wax modified bitumen, which leads to increased hardening (a favourable characteristic considering the resistance of the bituminous mixture to permanent deformation) at simultaneous lowering of cracking resistance at low temperatures. This indicates that this addition is able to ensure the durability of the bituminous mixture produced in WMA technology;
- compared with the RTFOT aging, the PAV aging affected basic parameters of the bitumen to a lesser degree;
- high values of the temperature plasticity range and penetration index indicate favourably low thermal susceptibility of the bitumens modified with the low-viscosity agent.

References

- [1] Wozuk A., Franus W.: *Properties of the Warm Mix Asphalt involving clinoptilolite and Na-PI zeolite additives*. Construction and Building Materials, 2016, vol. 114, pp. 556-563. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.188>.
- [2] Iwański M., Cholewińska M., Mazurek G.: *Viscoelastic properties of polymer modified bitumen in Warm Mix Asphalt technology in terms of ageing*. Procedia Engineering, 2017, vol. 172, pp. 401-408. Doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.007.
- [3] Judycki J., Stienss M.: *Mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło – przegląd dodatków*, Drogownictwo, nr 7-8, 2010, s. 227-232.
- [4] Iwański M., Mazurek G.: *The influence of the low-viscosity modifier on viscoelasticity behavior of the bitumen at high operational temperature*. 8th International Conference Environmental Engineering, May 19-20, 2011, Vilnius, Lithuania, pp. 1097-1102.
- [5] Piłat J., Radziszewski P.: *Nawierzchnie asfaltowe*. WKŁ, Warszawa 2010.

ponieważ zachowują lepkie właściwości w niskich temperaturach i przy krótkim czasie obciążenia oraz nie płyną w dodatnich temperaturach i przy długim czasie obciążenia.

Temperaturowy zakres plastyczności pozostaje w zależności z wartością IP. W przypadku wszystkich badanych modyfikacji asfaltów, zarówno po starzeniu krótko-, jak i długoterminowym uległ on wzrostowi, co oznacza, iż zwiększa się zakres temperatur, w których lepizsze zachowuje swoje właściwości lepko-sprężyste.

5. Wnioski

Na podstawie wykonanych badań i analiz można sformułować następujące wnioski:

- dodanie do lepiszcza wosku syntetycznego Fischera-Tropscha powoduje wzrost sztywności asfaltu charakteryzujący się spadkiem penetracji oraz wzrostem temperatury mięknięcia i temperatury łamliwości niezależnie do rodzaju asfaltu i ilości modyfikatora;
- starzenie technologiczne i eksploatacyjne powoduje zmiany właściwości reologicznych asfaltów modyfikowanych woskiem syntetycznym Fischera-Tropscha prowadzące do zwiększenia twardości lepiszcza (co ze względu na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe jest cechą sprzyjającą) przy równoczesnym niewielkim spadku odporności na spękania w niskiej temperaturze. Wynika z tego, że tego typu dodatek może zapewnić trwałość mieszanki mineralno-asfaltowej wyprodukowanej w technologii WMA;
- starzenie długoterminowe PAV w mniejszym stopniu wpłynęło na podstawowe parametry asfaltu niż starzenie krótkoterminowe RTFOT;
- wysokie wartości temperaturowego zakresu plastyczności oraz indeksu penetracji świadczą o korzystnie niskiej wrażliwości termicznej asfaltów modyfikowanych środkiem niskowiskozowym.

- [6] Trzaska E.: *Laboratoryjne metody badania procesu starzenia lepizczy asfaltowych, symulujące starzenie technologiczne, eksploatacyjne*. Nafta-Gaz, czerwiec 2010, s. 500-506.
- [7] Goreczna A.: *Wpływ dodatku wosku syntetycznego na starzenie asfaltu. Aktualne badania i analizy z inżynierii lądowej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013, s. 511-518.
- [8] Gawęł J., Kalabińska M., Piłat J.: *Asfalty drogowe*. WKŁ, Warszawa 2001.
- [9] Stefańczyk B., Mieczkowski P.: *Dodatki, katalizatory i emulgatory w mieszankach mineralno-asfaltowych*. WKŁ, Warszawa 2010.
- [10] Hurley G., Prowell B.: NCAT report 05-06, *Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt*. Auburn 2005.
- [11] Piłat J., Radziszewski P.: *Ocena właściwości reologicznych drogowych lepizczy asfaltowych w wyniku starzenia eksploatacyjnego PAV*. Zbiór referatów X Międzynarodowej Konferencji: Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce 2004.
- [12] Radziszewski P.: *Zmiany właściwości lepkością przystych lepizczy modyfikowanych i mieszanek mineralno-asfaltowych w wyniku procesu starzenia*. Rozprawy naukowe nr 142, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2007.
- [13] Iwański M., Cholewińska M., Mazurek G.: *Właściwości asfaltu z dodatkami modyfikującymi po procesie starzenia krótkoterminowego*. Budownictwo i Architektura, vol. 13(1) 2014, Politechnika Lubelska 2014, s. 15-27.
- [14] Iwański M., Mazurek G.: *Rheological characteristics of synthetic wax-modified asphalt binders*. Polimery, 2012, 57, no. 9, pp. 661-664.
- [15] Polacco G., Filippi S., Paci M.: *Structural and rheological characterization of wax modified bitumens*. Fuel, vol. 95, May 2012, pp. 407-416.
- [16] Stefańczyk B., Mieczkowski P.: *Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania*. WKŁ, Warszawa 2009.
- [17] Cholewińska M.: *Starzenie asfaltu drogowego 35/50 modyfikowanego asfaltem naturalnymi. Aktualne badania i analizy z inżynierii lądowej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013, s. 417-424.

LIGHTWEIGHT MORTARS WITH EXPANDED PERLITE MODIFIED BY ADMIXTURES

LEKKIE ZAPRAWY CEMENTOWE Z DODATKIEM PERLITU EKSPANDOWANEGO, MODYFIKOWANE DOMIESZKAMI

Abstract

The lightweight insulating cement mortars with expanded perlite reveal high porosity bound with the presence of this filler. However, their properties are lowered due to the absorption of water. The studies were performed with aim to improve the composition of cement – perlite mortars and their parameters, such as, density and the percentage of absorbed water by use of admixtures. The three series of mortars of similar consistency were produced with cement to perlite volume ratio of 1/3, 1/5 and 1/7 respectively. The water repellent and air entraining agents were used. The density and water absorption were measured and the observations of microstructure were carried out under SEM. The transport of water in the mortars was significantly slower and limited by use of admixtures. The proportions giving the lowered density at fairly low absorbability complying with the standard requirements have been pointed out. The advantageous effect of water repellent and air entraining agent has been proved.

Keywords: cement, perlite, absorbability, microstructure, admixtures, calorimetry, capillary action

Streszczenie

Lekkie zaprawy ciepłochronne sporządzone z udziałem perlitu ekspandowanego charakteryzują się podwyższoną porowatością, co skutkuje pogorszeniem niektórych właściwości użytkowych w obecności wilgoci. Praca stanowi podsumowanie badań mających na celu poprawę właściwości termoizolacyjnych tworzyw perlitowych poprzez wprowadzenie domieszek o działaniu hydrofobizującym i modyfikującym mikrostrukturę materiału. Sporządzono kilka serii zapraw cementowo-perlitowych o różnej zawartości perlitu. Przeprowadzono pomiary podciągania kapilarnego i standardową ocenę nasiąkliwości. Dokonano obserwacji pod elektronowym mikroskopem skaningowym, podczas których potwierdzono zwartą mikrostrukturę warstwy na granicy rozdziału: wypełniacz perlitowy – matryca cementowa. Ustalono proporcje cement/perlit/domieszka, zapewniające istotne zmniejszenie nasiąkliwości. Wskazano też na korzyści wynikające z zastosowania domieszki hydrofobizującej i napowietrzającej.

Słowa kluczowe: cement, perlit, podciąganie kapilarne, nasiąkliwość, mikrostruktura, domieszka hydrofobizująca

1. Introduction

Natural perlite is an amorphous volcanic rocks occurring in the Mediterranean Sea area. Crude perlite is ground and subjected to the short thermal treatment at temperature 900÷1000°C. This results in expansion of material due to the presence of some water evaporating with the formation of numerous small bubbles – pores in the structure (perlite expands up to 35 times of original volume).

1. Wprowadzenie

Perlit jest szklistym materiałem pochodzenia wulkanicznego występującym w stanie naturalnym w rejonie Morza Śródziemnego. Po wydobyciu ze złoża perlit jest mielony, a następnie poddawany krótkotrwałej obróbce cieplnej w temperaturze około 900÷1000°C. Pod działaniem wysokiej temperatury woda zamknięta w ziarnach perlitu odparowuje, wytwarzając ciśnienie powodujące rozkruszenie ziaren do wymiarów

The pores are surrounded by an amorphous, sintered mass rich in alumina and alkalis. As a consequence, perlite shows extremely low density and very good insulating properties and therefore it can be used as lightweight aggregate in the lightweight mortar/concrete. The density, microstructure, mechanical properties, durability and generally the advantages and inconveniences related to perlite application have been reported in some works [1, 2, 6-8, 14]. A synopsis about perlite as building material has been presented quite recently by Rashaad [12]. Perlite reveals good pozzolanic activity [8]; this means that it can contribute to the formation of hydration products. In cement composites with perlite the alkali silica reaction is mitigated, the compressive strength can be higher or lower – it depends upon the presence of other components [13]. It is possible to modify the perlite component with aim to produce materials of special multifunctional character [11]. Generally, the properties of perlite composites can be shaped by the proportions between the main constituents and by use of modifiers.

Perlite materials, because of the high porosity of the filler, take up significant amount of water penetrating the open pore structure thus worsening their insulating and mechanical characteristics, as well as the durability. In our earlier works [3, 5, 10] the pozzolanic effect of perlite and the intensive heat evolution in the systems hydrated with perlite was proved. The decrease of compressive strength and increase of flexural strength in case of insulating mortars with high perlite amount was found [9]. In the presented work the permeability/absorption of water in the presence of water repellent and air entraining/superplasticizing admixtures is discussed.

2. Experimental

2.1. Materials

Perlite expanded commercially available was used. The chemical composition and some properties of material are given in table 1.

rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset mikrometrów. Jednocześnie zachodzi spiekanie szkliwa wulkanicznego i tworzą się szkliste banieczki o nieregularnych kształtach, puste w środku. Dzięki banieczkom objętość wyjściowego materiału może wzrosnąć nawet do 35 razy. Ten proces spęczniania określane jest jako ekspansja, a utworzony w ten sposób materiał jest perlitem ekspandowanym. Amorficzna substancja otaczająca pory jest bogata w glin i alkalia. Perlit wykazuje bardzo mały ciężar nasypowy, a zastosowany jako kruszywo lekkie (wypełniacz) w zaprawach, tynkach, wylewkach i betonach nadaje tym materiałom bardzo dobre właściwości izolacyjne.

Gęstość, mikrostruktura, właściwości mechaniczne, trwałość, jak również korzyści i zagrożenia wynikające z zastosowania perlitu zostały przedstawione w nielicznych raportach [1, 2, 6-8, 14]. Przeglądową pracę na temat perlitu, jako materiału budowlanego, opublikował niedawno Rashaad [12]. Perlit wykazuje bardzo dobre właściwości pucolanowe [8], oznacza to, że uczestniczy w tworzeniu produktów hydratacji. W kompozytach cementowo-perlitowych nie stwierdza się pęcznienia alkalicznego. Wytrzymałość jest bardzo różna i można ją kształtować w zależności od przeznaczenia materiałów poprzez odpowiedni dobór proporcji poszczególnych składników [13]. Jest też możliwa modyfikacja perlitu w celu wytworzenia specyficznych kompozytów wielofunkcyjnych [11]. Materiały zawierające perlit pochłaniają, z uwagi na wysoką porowatość tego składnika, znaczne ilości wody penetrującej otwartą strukturę porów, co wpływa bardzo destrukcyjnie na właściwości termoizolacyjne, jak również na wytrzymałość i trwałość. W naszych wcześniejszych pracach [3, 5, 10] pokazany został istotny wpływ perlitu na wydzielanie ciepła w procesie wiązania, wynikający z reakcji pucolanowej. Stwierdzono również spadek wytrzymałości na ścislenie i wzrost wytrzymałości na zginanie w przypadku zapraw modyfikowanych znaczną ilością perlitu [9]. Prezentowana praca dotyczy transportu i absorpcji wody w zaprawach cementowo-perlitowych z domieszką hydrofobizującą i napowietrzająco-superplastyfikującą.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały

Perlit ekspandowany zastosowany w badaniach jest produktem krajowym otrzymanym przez przetworzenie surowca z importu. Skład chemiczny oraz wybrane właściwości materiału przedstawiono w tabeli 1.

Table 1. The properties of perlite material

Tabela 1. Właściwości perlitu

Bulk density [kg/m ³]	66.8
Moisture content [%]	0.5
Chemical composition:	
L.o.i.	0.6%
SiO ₂	76.2%
Al ₂ O ₃	12.5%
Fe ₂ O ₃	1.3%
MgO	2-6%
CaO	0.5%
TiO ₂	0.4%
MgO	0.7%
K ₂ O	4.5%
Na ₂ O	3.1%

The lightweight perlite mortars were produced using standard CEM I 42.5R type cement, starting from the dry mixtures in which the cement to perlite volume ratios were 1/3, 1/5 and 1/7, respectively. The bulk density of perlite was 66.8 g/dm³, while that of cement 998 g/dm³. The water was added to meet the standard consistency according to the EN 1015-3:2002 standard: "Methods of test for mortar for masonry" (a multi part standard), it means to produce the mortar cake of diameter in the range 12-13 cm. In such a way the mortars differed significantly with process water content (see Table 2), but revealed a similar workability.

The structure and properties of mortars were improved by use of two type admixtures: the water repellent (silicon – organic compound with some modifiers), protecting both surface and bulk of mortar against water penetration and the strongly surface-active air-entraining admixture acting additionally as a plasticizer (based on the sodium lauryl sulfate); the latter one was added only to the mortar with the highest perlite content (1/7 by volume). The basic composition of mortars is presented in Table 2 and their unit weights, with or without admixtures, as measured after mortar preparation, are given in Table 3. The unit weight of mortar with air entraining admixture was markedly reduced - therefore this material plays a role of the "lightweight thermal insulation".

The percentages of admixtures matched well with the producer's recommendation (note: low percentages of air entraining agents). The high water to cement ratios resulting from the high absorbability of perlite (water contents contribute to the stable, standard consistency) were kept constant in the presence of admixtures in absorbability experiments. As one see in Table 3, both

Zaprawy perlitowe sporządzono z udziałem standardowego cementu CEM I 42,5R w oparciu o mieszanki spoiwowe, w których relacje objętościowe pomiędzy cementem i perlitem wynosiły odpowiednio 1/3, 1/5 i 1/7 (gęstość nasypowa perlitu wynosiła 66,8 g/dm³, natomiast cementu – około 998 g/dm³). Wodę wprowadzano w takiej ilości, aby świeże zaprawy uzyskały konsystencję standardową według normy EN 1015-3:2002 „Metody badań zapraw do murów”, to znaczy, aby średnica rozplywu mieściła się w granicach 12-13 cm. Skład zapraw podany jest w tabeli 2, a masa 1 m³ zapraw w tabeli 3. A zatem zaprawy różniły się zawartością wody (tab. 2), ale wykazywały bardzo podobną urabialność. W taki sam sposób postępowano w przypadku zapraw z domieszkami.

Strukturę i właściwości zapraw modyfikowano za pomocą dwóch rodzajów domieszek: hydrofobizującej (związek krzemooorganiczny z dodatkami), zabezpieczającej zarówno powierzchnię, jak i wewnątrz materiału, oraz napowietrzającej na bazie siarczynu laurynowo-sodowego. Domieszkę napowietrzającą wprowadzano jedynie do zaprawy o największym udziale perlitu (zaprawa 1/7) i zmniejszyła ona znacznie gęstość materiału (tab. 3).

Dozowanie domieszek było zgodne z zaleceniami producentów (zauważ: bardzo mały udział procentowy domieszki napowietrzającej). Udział wody (w/c) wynikający z właściwości sorpcyjnych perlitu, gwarantujący stabilną konsystencję i urabialność w stadium początkowym, zachowywano na stałym poziomie przy wprowadzaniu do zapraw domieszek. Można zauważyć, że domieszki zmniejszyły masę

Table 2. Composition of mortars – amounts of component used to produce 1 m³ of mortar
Tabela 2. Skład zapraw cementowo-perlitowych

Cement/perlite volume ratio	1/3	1/5	1/7
Water [kg/m ³]	447	508	518
Cement [kg/m ³]	447	318	216
w/c	1.0	1.6	2.4
Perlite [kg/m ³]	79	79	69

Table 3. Unit weight of cement – perlite mortars

Tabela 3. Gęstość objętościowa zapraw cementowo-perlitowych

Unit weight [kg/m ³]				
Cement/perlite volume and water/cement ratio		1/3 w/c = 1.0	1/5 w/c = 1.6	1/7 w/c = 2.4
Perlite content [% by mass]		17%	25%	32%
No admixture	0	972	904	801
Water repellent % by mass of cement	0.3	895	723	629
	0.6	887	715	608
Air entraining agent % by mass of cement	0.01	x	x	689
	0.03	x	x	675
	0.05	x	x	534
x – not prepared				

water repellent and air entraining agent bring about significant decrease of mortar unit weight.

The perlite mortars were classified as CS I materials, according to the EN 998-1:2003 standard, because their compressive strength were in the range from 0.4 MPa to 2.5 MPa [9]. Fortunately, in most applications these materials need not meet the severe requirements as the strength parameters are concerned. Generally, the strength of mortars is controlled by perlite ratio and decreases with perlite content (and increasing amount of water).

2.2. Methods

The standard mortar bars 4 x 4 x 16 cm were produced and cured according to the EN 1015:2003 standard: “Methods of test for mortar for masonry”. First of all the mortars were produced and cast in the molds for 48 h. The fresh mortars were not vibrated, as it is recommended in the standard, because of potential segregation of lightweight aggregate and paste. Subsequently, the bars were cured at standard conditions (at 95% RH and then at 65%, temperature 21°C). After 28 days from the mortar preparation they were dried to the constant mass. For standard

1 m³ zaprawy (tab. 3). Badane zaprawy zaklasyfikowano do materiałów typu CS I według normy EN 998-1:2003, ponieważ ich wytrzymałości na ściskanie kształtowały się na poziomie od 0,4 MPa do 2,5 MPa [9]. W przypadku materiałów termoizolacyjnych dla większości zastosowań nie są potrzebne tworzywa o wysokich parametrach wytrzymałościowych. Wytrzymałość zapraw jest pochodną udziału perlitu i maleje z zawartością tego składnika oraz ze zwiększającym się wskaźnikiem w/c.

2.2. Metody badań

Próbki do badań transportu wody w zaprawach uformowano w postaci standardowych belek prostokątnych o wymiarach 4 x 4 x 16 cm, według normy EN 1015-3:2003 „Metody badań zapraw do murów”. Zaprawy po wprowadzeniu do form nie były zagęszczane (wytrząsane) na stoliku wibracyjnym z uwagi na obecność lekkiego kruszywa perlitowego, które w trakcie wibrowania ulegałoby segregacji. Badania podciągania kapilarnego przeprowadzono zgodnie z normą EN 1015-18:2003. Belki zaprawy, wyjęte po 48 godzinach z form, przechowywano w laborato-

absorption coefficient determination the side walls were coated with an impermeable layer and the bottom parts of bars were immersed in water in a way described in relevant standard). The specimens were subjected to the continuous non-standard measurements of capillary action, determined as a height of water penetration level vs. time. These experiments were carried out during the 56-day period. The standard absorption coefficient was determined according to the formula given in EN 1015-18:2003 standard, based on the values of mass increment obtained after 10 and 90 min. of exposure to water.

The microstructure of fractured mortar samples (covered with gold) was observed under the scanning electron microscope (SEM) with microanalysis by energy dispersive X-ray spectrometer (EDX) (FEI Nano-Nova 200 with Link ISIS microanalytical equipment).

3. Results and discussion

3.1. Absorbability measurements

The transport of water in the hardened cement – perlite mortars was investigated at temperature 20°C, based on the specimens prepared according to the EN 1015-18:2003 standard. The effects are given as the water penetration height vs. time plots in Figures 1, 2. The results of water absorption coefficient standard calculations are listed in Table 4. According to EN 1015-18 the water absorption coefficient is “a gradient of the straight line obtained by plotting the cumulative mass of water absorbed per unit area against the square root of time” (the comparison of capillary water absorption coefficients has been reported quite recently [4]).

Table 4. Absorption coefficient according to EN-1015-18

Tabela 4. Współczynnik absorpcji według EN-1015-18

Cement/perlite volume ratio		Standard absorption coefficient [kg/m ² × min ^{0.5}]		
		1/3	1/5	1/7
No admixture	0	0.03	0.58	1.05
Water repellent % by mass of cement	0.3	0.02	0.48	0.81
	0.6	0.02	0.42	0.77
Air entraining agent % by mass of cement	0.01	x	x	0.94
	0.03	x	x	1.02
	0.05	x	x	0.83
x – not prepared (see Table 3)				

rium w warunkach podanych w normie, początkowo przy wilgotności względnej 95%, następnie przy wilgotności względnej 65%, w temperaturze 21°C (tzw. warunki powietrzno-suche). W warunkach wilgotnych belki dojrzewały 28 dni, po czym suszone były do stałej masy i umieszczane pionowo w kuwetach w wodzie; boczne ścianki pokrywano warstwą silikonu, tak że wnikanie wody było możliwe jedynie od spodu. Podciąganie kapilarne określano, mierząc wysokość wznoszenia zabarwionej wody. Pomiary (niestandardowe) trwały 56 dni. Standardowe współczynniki absorpcji obliczano według wzoru podanego w normie EN 1015-18:2003 na podstawie różnicy masy próbek po 10 i 90 minutach ekspozycji na działanie wody.

Okruchy próbek (pokryte warstwą złota) po badaniu podciągania kapilarnego (a więc po trzech miesiącach dojrzewania) poddano obserwacjom w elektronowym mikroskopie skaningowym z analizatorem dyspersji energii promieniowania X (EDX) (mikroskop FEI Nano-Nova 200 z mikroanalizatorem Link ISIS).

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Pomiary podciągania kapilarnego i współczynnika absorpcji

Transport wody w stwardniałych zaprawach cementowo-perlitowych badano w temperaturze 20°C, na próbkach przygotowanych według normy EN-1015-18:2003. Wyniki w postaci wykresów podciągania kapilarnego w funkcji czasu pokazano na rysunkach 1 i 2, a obliczone współczynniki absorpcji zamieszczono w tabeli 4. Absorpcja wody jest oceniana na podstawie przyrostu masy w związku z podciąganiem kapilarnym; porównanie współczynników absorpcji wielu materiałów budowlanych można znaleźć w niedawno opublikowanym raporcie [4].

As one can see in Table 4, only the mortars with the lowest perlite content comply with the standard requirements for the absorbability category W1; the other ones can be categorized as W0 materials. Therefore, as one could expect, the perlite ratio is a key parameter controlling the water transfer throughout the structure of the lightweight mortar and the potential use of mortars.

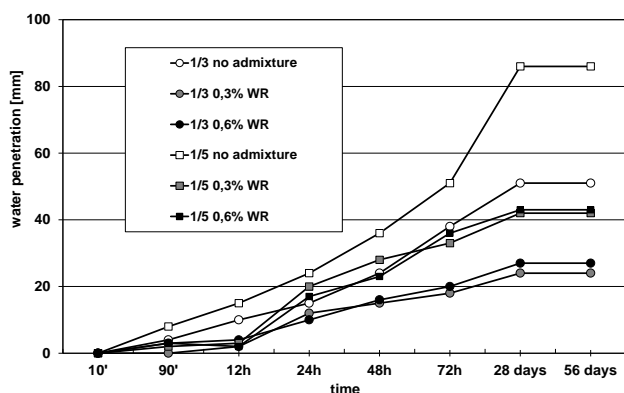


Fig. 1. Water penetration height vs. time, as a result of capillary action, in the mortars produced at cement to perlite volume ratio 1/3 and 1/5 respectively, with no admixture and with water repellent (WR)

Rys. 1. Podciąganie kapilarne wody w zaprawach o stosunku objętościowym cement/perlit 1/3, 1/5 z domieszką hydrofobizującą (WR)

Obviously, the values of parameters characterizing the water penetration height increase with time and perlite ratio. Generally, water penetration height (Figs. 1 and 2) grows steadily up to 28-day maturing, when the saturation of structure with water is observed; the results for 56 days cured samples are only slightly higher. Analyzing these data one can find the significant effect of water repellent as the water absorption controlling agent (particularly at dosage 0.6% by mass of cement), reducing first of all the capillary rise to about half of the reference value after 28 days in case of mortars with cement to perlite volume ratio of 1/3 and 1/5 respectively (Fig. 1). This can be attributed to the hydrophobic admixture, limiting the permeability of capillary pore system in hydrated cement paste part of the composites.

In case of 1/7 mortar the absorption of water is extremely intensive, due to the excess of perlite, contributing to the transport of water throughout the perlite pores (see SEM data). The effect of water repellent on the reduction of capillary action and water absorption is less pronounced – the high

Jak można zauważyć (tab. 4), zaprawy o najmniejszej zawartości perlitu (1/3) mogą zostać zakwalifikowane, z uwagi na wartości współczynników absorpcji, do kategorii W1. Zaprawy o większym udziale perlitu spełniają wymagania normy dla kategorii W0. Tak więc, jak można było przypuszczać, zawartość perlitu jest parametrem decydującym o nasiąkliwości zapraw cementowo-perlitowych i ich potencjalnej użyteczności.

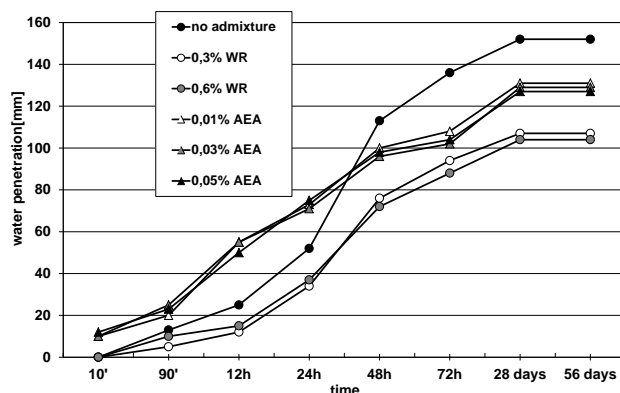


Fig. 2. Water penetration height vs. time, as a result of capillary action, in the mortars produced at cement to perlite volume ratio 1/7, with no admixture and with water repellent (WR) or air entraining agent (AEA)

Rys. 2. Podciąganie kapilarne wody w zaprawach o stosunku objętościowym cement/perlit 1/7 z domieszką hydrofobizującą (WR) lub napowietrzającą (AEA)

Podciąganie kapilarne charakteryzujące transport wody w materiale wzrasta z czasem ekspozycji i zawartością perlitu. Systematyczny wzrost podciągania kapilarnego (rys. 1, 2) obserwowany jest do 28 dnia badania; wyniki po 56 dniach są nieznacznie wyższe. Analizując przedstawione dane, można stwierdzić, że istotną rolę czynnika ograniczającego nasiąkliwość odgrywa domieszka hydrofobizująca (szczególnie wtedy, gdy wprowadzana jest w ilości 0,6% masy cementu), zmniejszająca, w przypadku zapraw o stosunku objętościowym cement/perlit wynoszącym 1/3 i 1/5, podciąganie kapilarne do około połowy wartości stwierdzonej po 28 dniach eksperymentu dla próbek kontrolnych bez domieszki (rys. 1). Efekt ten przypisać należy hydrofobizującemu działaniu domieszki, hamującemu przemieszczanie się wody w porach kapilarnych stwardniałego zaczynu cementowego w kompozycie.

W przypadku zaprawy o stosunku objętościowym cement/perlit wynoszącym 1/7 pochłanianie wody jest szczególnie intensywne, z uwagi na nadmiar perlitu biorącego udział w transportowaniu wody poprzez swój system porów (por. obrazy mikrostruktury). Wpływ

perlite ratio is the main water transport controlling factor; the role of cement matrix is reduced. In cement – perlite 1/7 mortars with air entraining agent (dosage about order of magnitude lower) the intensive absorption and capillary rise, higher than for reference, is observed during the first 1-2 days (Fig. 2). In the presence of air entraining agent (dosage about order of magnitude lower) the intensive absorption and capillary action, higher than for reference, is observed in 1/7 mortar during the early stage of maturing (first 1-2 days). At later age the reduction of water transport in the mortars takes place. One can speculate that the pore structure becomes less opened, since the fragmentation of capillary pores due to the air bubbles occurs (the same phenomenon as improving the freeze – thaw resistance).

As one can see, the amount of water absorbed in perlite mortars with lower perlite content, noted as 1/3 and 1/5 (17% and 25% by weight of cement respectively) is significantly lower than the uptake of water in 1/7 mortar. However, the volumes of perlite in the initial dry mixtures constitute 75%, 83% and 88% of mixed dry components respectively. After 24 hours and later the transport of water occurs much less intensively at 75% and 83% perlite percentage by volume than at 88% by volume. Therefore, the authors are of the opinion that between the 1/5 and 1/7 volume proportion the “percolation treshold” is attained and the role of cement paste sub-structure as the sorptivity controlling factor becomes seriously weakened. Furthermore, it seems reasonable not to exceed the volume cement to perlite proportion 1/5 in case of potential water attack. However, the proportion 1/7 could be taken into account in dry air conditions. The use of admixtures is recommended in every case.

3.2. Observations of microstructure

The observations of microstructure were carried out in order to characterize the perlite – cement paste interface. The fractured samples after the absorbability measurements (that is after 3 months maturing) were examined under SEM (Photo 1, 2). The micrographs of perlite mortars taken at low magnification reveal their high porosity resulting from the presence of characteristic, porous perlite filler (Photo 1a, 2a); it is clearly seen, particularly in Photo 2a (cement to perlite = 1/7). Simultaneously the homogeneous distribution

środka hydrofobizującego w kierunku zmniejszenia podciągania kapilarnego i nasiąkliwości zaznacza się słabiej – o transporcie wody decyduje wysoka zawartość porowatego perlitu; rola matrycy cementowej jest mniejsza. Gdy zastosowany jest środek napowietrzający (wprowadzony w niewielkiej ilości – o rząd wielkości mniejszej niż domieszka hydrofobizująca), początkowo (1-2 dni) obserwuje się intensywny wzrost ilości podciągania kapilarnego (rys. 2), ale później transport wody ulega zahamowaniu. Efekt ten można wyjaśnić ograniczeniem ciągłości struktury porów kapilarnych przez banieczki powietrza wprowadzone wskutek działania domieszki (podobne zjawisko przyczynia się do zwiększenia mrozoodporności materiału).

Jak można stwierdzić, analizując wyniki podciągania kapilarnego i nasiąkliwości przy podciąganiu kapilarnym, ilości wody zaabsorbowanej w zaprawie cementowo-perlitowej o mniejszej zawartości perlitu, to znaczy o stosunku objętościowym cement/perlit wynoszącym odpowiednio 1/3 i 1/5 (o udziale masowym odpowiadającym 17% i 25%), są znacznie mniejsze niż w przypadku zaprawy o stosunku 1/7. Udziały objętościowe perlitu w suchych mieszankach przed sporządzeniem zapraw wynoszą odpowiednio 75%, 83% i 88% (dla zestawów oznaczonych 1/3, 1/5 i 1/7). O wiele mniej dynamiczny transport wody ma więc miejsce przy udziale objętościowym 75% i 83% niż przy 88% perlitu. To spostrzeżenie skłania do postawienia hipotezy, że pomiędzy stosunkiem objętościowym cement/perlit, wynoszącym 1/5 i 1/7, mieści się „próg perkolacji”, co oznacza, że ziarna perlitu tworzą ciągłą podstrukturę, a rola zaczynu cementowego, jako czynnika ograniczającego migrację wody, zostaje poważnie osłabiona. Tak więc wydaje się wskazane ograniczenie proporcji pomiędzy cementem i perlitem do 1/5, jeżeli możliwy jest atak wody; zaprawa o stosunku objętościowym cement/perlit wynoszącym 1/7, może być stosowana w warunkach powietrzno-suchych. W każdym przypadku zaleca się stosowanie domieszek.

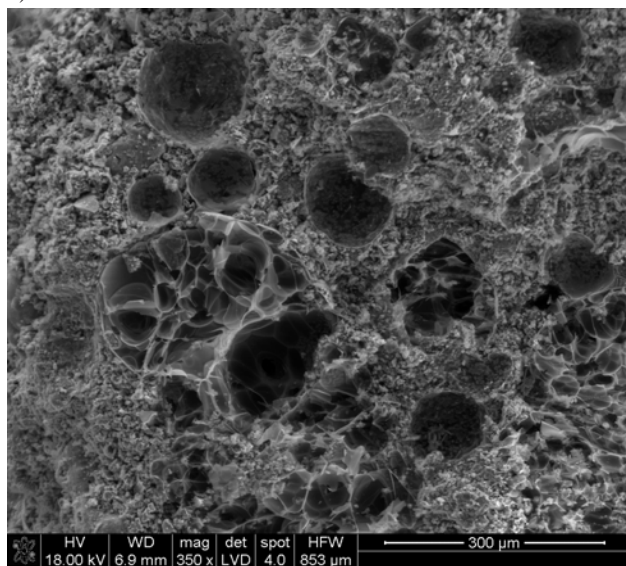
3.2. Obserwacje mikrostruktury

Obserwacje mikrostruktury prowadzono głównie w celu scharakteryzowania strefy kontaktowej perlit – zaczyn cementowy. Przelamy próbek po pomiarach podciągania kapilarnego (to znaczy po trzech miesiącach od przygotowania próbek) poddano badaniom w mikroskopie elektronowym z mikroanalizatorem (fot. 1, 2). Zdjęcia zapraw perlitowych wykonane przy małym powiększeniu ujawniają obecność charakterystycznych, porowatych ziaren perlitu (fot. 1a). Szczególnie dobrze oddaje porowatą mikrostrukturę

of perlite is observed. The perlite grains are embedded in cement matrix, composed of C-S-H, portlandite, ettringite and surrounded by dense crust of hydration products, adjacent to perlite pieces (Photo 1b, 2b). The relatively dense product on the external surface of perlite is formed, due to the pozzolanic reaction [8]. The shortage of weak transition zone has been reported previously [10, 14]. At higher magnification there are the sponge – like structures of calcium silicate hydrate visible in cement matrix (Photo 1b). The ettringite needles are abundant particularly at the highest perlite dosage, when the additional aluminat ions, as well as alkali cations enhancing the ettringite formation, enter the hydration process.

fotografia 2a (zaprawa 1/7), która ponadto świadczy o homogenicznym rozprowadzeniu wypełniacza. Ziarna perlitu zanurzone są w matrycy zaczynu cementowego, złożonego z uwodnionych przemianów wapniowych typu C-S-H, portlandytu i ettringitu. Upakowana otoczka głównie produktu C-S-H, przylegająca ściśle do powierzchni okruchów perlitu (fot. 1b i 2b), powstała w wyniku reakcji pucolanowej [8]. Już wcześniej sygnalizowano w literaturze brak w tego rodzaju materiałach strefy przejściowej o luźnej strukturze [10, 14]. Duże powiększenie umożliwia dostrzeżenie gąbczastej struktury C-S-H (fot. 1b). Kryształy ettringitu o włóknistym pokroju występują w znacznej ilości w zaczynie przy największej zawartości perlitu, gdy w procesie hydratacji uczestniczą jony glinu i alkaliów pochodzące z materiału wypełniacza.

a)



b)

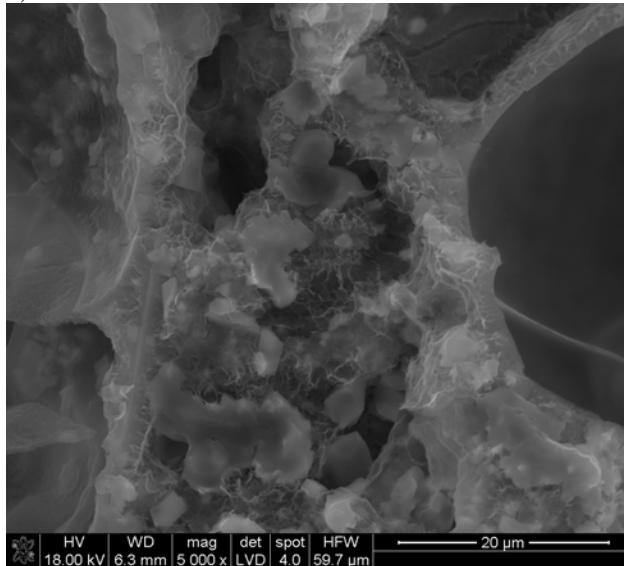


Photo 1. (a) Microstructure of cement – perlite mortar 1/3 with 0.3% WR admixture. The porous perlite grains and the air pores are surrounded by the products of cement hydration. (b) Microstructure of cement – perlite mortar 1/7 with 0.01% AEA admixture. See the hydration products in cement matrix close to perlite grain – mainly sponge – like calcium silicate hydrate (C-S-H) rich in Al, as it has been found by microanalytical method (EDX)

Fot. 1. (a) Mikrostruktura zaprawy perlitowo-cementowej o stosunku objętościowym cement/perlit 1/3 z domieszką hydrofobizującą (0,3%); trzy miesiące dojrzewania. Porowate ziarna perlitu i pory powietrzne w otoczeniu produktów hydratacji. (b) Mikrostruktura zaprawy perlitowo-cementowej o stosunku objętościowym cement/perlit 1/7 z domieszką napowietrzającą (0,01%); trzy miesiące dojrzewania. Widoczne produkty hydratacji cementu na granicy ziarna perlitu, głównie faza C-S-H o gąbczastej budowie, bogata w Al (potwierdzone metodą EDX)

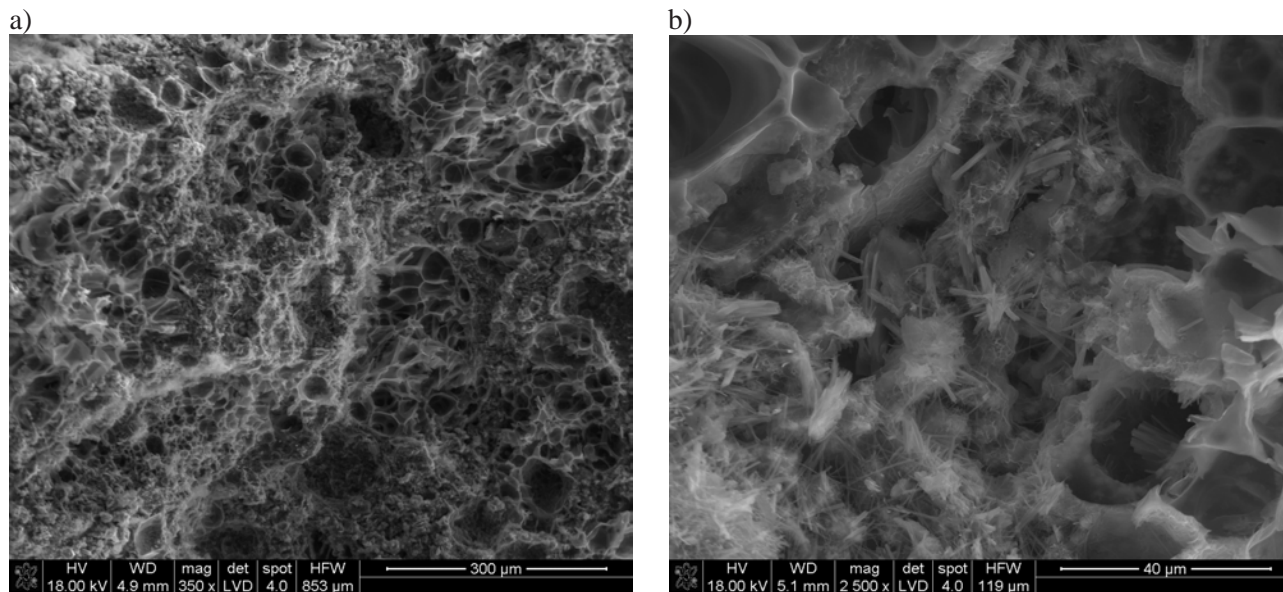


Photo 2. (a) Microstructure of cement – perlite mortar 1/7 with 0.03% AEA admixture. The perlite filler homogeneously distributed throughout the material with no distinct perlite/paste interfaces. (b) Microstructure of cement – perlite mortar 1/7 with 0.03% AEA admixture. The area enriched in ettringite (calcium trisulphoaluminate hydrate), formed between and inside the perlite grains as it has been found by microanalytical method (EDX)

Fot. 2. (a) Mikrostruktura zaprawy perlitowo-cementowej o stosunku objętościowym cement/perlit 1/7 z domieszką napowietrzającą (0,03%); trzy miesiące dojrzewania. Zwraca uwagę brak wyraźnych granic rozdziału perlit-zaczyn cementowy. (b) W powiększonym obrazie matrycy zaczynowej przeważają skupienia wydłużonych kryształów ettringitu (trójsiarczanoglinianu wapnia) utworzone pomiędzy ziarnami perlitu i wewnątrz ziaren (potwierdzone metodą EDX)

4. Conclusions

1. The perlite ratio is a key parameter controlling the water water transfer in cement – perlite mortar. The effect of admixtures is of great importance too. The effect of water repellent on the reduction of water transport is better pronounced at cement – perlite volume ratio 1/3 and 1/5.
2. The reduction of capillary action by use of water repellent in case of mortars with cement – perlite volume ratio 1/3 and 1/5 is a half of water penetration level for reference samples.
3. In cement/perlite 1/7 mortar, with 32% cement replacement by mass, the expected effect of pore structure modification in the paste is limited because of the high perlite content. The effect of water repellent on the reduction of capillary action and water absorption is less pronounced. In the presence of air entraining agent some reduction of capillary action can be achieved.
4. The transport of water is additionally limited by the formation of impermeable layer of cement hydration products, adjacent to the perlite grains.
5. The volume cement to perlite proportion about 1/5 should not be exceeded in case of potential water attack. The proportion 1/7 could be taken into

4. Wnioski

1. Zawartość perlitu w zaprawie cementowo-perlitowej ma istotny wpływ na podciąganie kapilarne: im większa zawartość perlitu, tym większa porowatość zaprawy i intensywniejszy transport wody. Rolę czynnika ograniczającego nasiąkliwość odgrywają domieszki hydrofobizujące, szczególnie w zaprawie o stosunku objętościowym cement/perlit wynoszącym 1/3 i 1/5.
2. Domieszka hydrofobizująca ogranicza podciąganie kapilarne zaprawy perlitowej o stosunku objętościowym cement/perlit wynoszącym 1/3 i 1/5 do około połowy poziomu dla materiału odniesienia.
3. W zaprawie o stosunku objętościowym cement/perlit wynoszącym 1/7, to znaczy przy udziale wynoszącym 32% masy suchej mieszanki, działanie domieszki hydrofobizującej jest mniej skuteczne; w pewnym stopniu podciąganie kapilarne jest też zredukowane w obecności domieszki napowietrzającej.
4. Utworzenie szczelnej, przylegającej do ziaren perlitu warstwy produktów hydratacji cementu sprzyja ograniczeniu transportu wody.
5. Wskazane jest ograniczenie proporcji pomiędzy cementem i perlitem do 1/5, jeżeli spodziewany

account in dry air conditions. The use of water repellents is highly recommended.

jest atak wody; zaprawa o stosunku objętościowym cement/perlit wynoszącym 1/7 może być stosowana w warunkach powietrzno-suchych. W każdym przypadku zaleca się stosowanie domieszek ograniczających transport wody.

References

- [1] Elsharief A., Cohen M.D., Olek J.: *Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone*. Cem. Concr. Res. 33 (2003), pp. 1837-49. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00205-9.
- [2] Erdoğan S.T., Sağlık A.Ü.: *Early-age activation of cement pastes and mortars containing ground perlite as a pozzolana*. Cem. Concr. Comp. 38 (2013), pp. 29-39, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.004>.
- [3] Kapeluszna E., Kotwica Ł., Pichór W., Nocuń-Wczelik W.: *Study of expanded perlite by-product as the mineral addition to Portland cement*. Cement – Wapno – Beton 20/82 (2016), pp. 38-44. Karagiannis N., Karaglou M., Bakolas A., Moropoulou A. [in:] *New Approaches to Building Pathology and Durability*, ed. By J.M.P.Q. Delgado, Springer, Singapore 2016.
- [4] Karagiannis N., Karaglou M., Bakolas A., Moropoulou A. [in:] *New Approaches to Building Pathology and Durability*, ed. By J.M.P.Q. Delgado, Springer, Singapore 2016.
- [5] Kotwica Ł., Pichór W., Nocuń-Wczelik W.: *Study of pozzolanic action of ground waste expanded perlite by means of thermal methods*. Jour. Therm. Anal. Calor. 123/1 (2016), pp.607-613. doi: 10.1007/s10973-015-4910-8.
- [6] Kramar D., Bindiganavile V.: *Impact response of lightweight mortars containing expanded perlite*. Cem. Concr. Comp. 37 (2013), pp. 205-14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.10.004>.
- [7] Lanzón Torres M., García-Ruiz P.A.: *Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability*. Constr. Build. Mat. 22 (2008), pp. 1798-1806, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.05.006.
- [8] Lanzón Torres M., García-Ruiz P.A.: *Lightweight pozzolanic materials used in mortars: evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption*. Cem. Concr. Comp. 31 (2009), pp. 114-9, doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.11.003.
- [9] Nocuń-Wczelik W., Nowak M., Trybalska B.: *Transport wody w zaprawach z dodatkiem perlitu ekspandowanego modyfikowanych domieszkami (Transport of water in the mortars with perlite addition modified by admixtures)*. *PTcer (Ceramic Materials)*, IX Konferencja i Zjazd Polskiego Towarzystwa Ceramicznego, Zakopane, 19-22 września 2013.
- [10] Nocuń-Wczelik W., Nowak M., Trybalska B.: *Transport wody w zaprawach z dodatkiem perlitu ekspandowanego modyfikowanych domieszkami (Transport of water in the mortars with perlite addition modified by admixtures)*. *Materiały Ceramiczne (Ceramic Materials)*, 66 (2014), pp. 62-67.
- [11] Pichór W., Szymański M.: *The properties of expanded perlite impregnated by redispersible acrylate copolymer* [in:] Proc. of Conference „Dni Betonu: tradycja i nowoczesność”, ed. by P. Kijowski, Deja J., Polish Cement Association, Kraków 2012, pp. 293-299.
- [12] Rashad A.M.: *A synopsis about perlite as building material – a best practice guide for civil engineer*. Constr. Build. Mat. 121 (2016), pp. 338-353, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.001>.
- [13] Wasserman R., Bentur A.: *Interfacial interaction in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength*. Cem. Concr. Comp. 18 (1996), pp. 67-76, [http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465\(96\)00002-9](http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465(96)00002-9).
- [14] Zhang M.H., Gjorv O.E.: *Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste*. Cem. Concr. Res. 20 (1990), pp. 610-18, [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90103-5](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(90)90103-5).

DEFECTS IN STRUCTURAL TIMBER

WADY DREWNA KONSTRUKCYJNEGO

Abstract

The paper presents the defects that are typically found in structural timber. The model of the so-called flawless timber has been made more precise. Additionally, the impact of defects on timber quality was characterised. Defect classification with respect to the time of formation, type and causes was presented. The following defects were discussed in a detailed manner: knots, twisted fibres, cracks, resin pockets, stains, rots, insect channels, waness, shape defects and sclerenchyma fibres. The main objective of the paper is to show actual imperfections in the conifer wood revealed in the examined elements. The cross-sections of round timber and construction and structural sawn timber were analysed.

Keywords: timber, wood defects, knots, cracks, resin pockets, stains, rots, insect channels, waness, twisted fibres, curves, sclerenchyma fibres

Streszczenie

W artykule przedstawiono typowe wady drewna konstrukcyjnego. Przybliżone zostały wzorce tzw. drewna bezbłędnego. Scharakteryzowano również wpływ wad na jakość drewna oraz ich podział w odniesieniu do czasu powstania, rodzaju uszkodzeń i ich przyczyn. Szczegółowo zilustrowano sęki, skręt włókien, pęknięcia, pęcherze żywiczne, zabarwienia, zgnilizny, chodniki owadzie, obliny, wady kształtu oraz twardzicę. Głównym celem pracy jest ukazanie rzeczywistych niedoskonałości przebadanych elementów z drewna iglastego. Przeanalizowano przekroje drewna okrągłego oraz tarcicy budowlano-konstrukcyjnej.

Słowa kluczowe: drewno, wady drewna, sęki, pęknięcia, pęcherze żywiczne, zabarwienia, zgnilizna, chodniki owadzie, obliny, skręt włókien, krzywizny, twardzica

1. Introduction

Wood is an organic material formed during the growth of trees. Wood features and properties reflect the functional processes taking place in a living plant. Wood is anisotropic and highly non-homogenous material [1-6] that can be converted into multiple products provided that it has standard physical and chemical properties, and uniform structure. External factors can cause changes in wood parameters. Deformations and disadvantageous properties are termed wood defects. Flawless wood is thought to have a cylindrical shape, and be clear, i.e. free from knots, or piths. It should have annual rings of the same width, and also perfectly parallel, with respect to the longitudinal axis, arrangement of fibres. Any deviations from this pattern, however theoretical and approximate it might be, are considered wood defects.

The latter involve various abnormalities which result from tree diseases, mechanical injuries, and natural

1. Wprowadzenie

Drewno to surowiec organiczny wykształcony podczas wzrostu roślin drzewiastych. Cechy i właściwości drewna są odwzorowaniem funkcji, jakie pełni w żywym organizmie roślinnym. Drewno to materiał anizotropowy, wysoce niejednorodny [1-6], który pełni rolę korzystnego wyrobu, jeśli ma standardowe właściwości fizyczne, chemiczne i równomierną budowę. Czynniki zewnętrzne mogą powodować zmiany parametrów drewna. Deformacje budowy i niekorzystne właściwości drewna klasyfikuje się jako wady drewna. Materiał bez wad określany jest jako drewno o profilu walca, bezsęczne, bezrdzeniowe, o równej szerokości słoików rocznych oraz modelowo równoległym układzie włókien w stosunku do osi podłużnej. Jakikolwiek inne wyjątki od przybliżonego i teoretycznego wzorca traktowane są jako wady.

Wady drewna to różnorodne zakłócenia kształtu będące rezultatem chorób drzew, uszkodzeń mecha-

features. Wood defects limit the range of applications, or make the material useless. As regards timber quality, the significance of wood defects is related to their type, size and location. Due to enormous diversity in wood defects, and also in causes of those, it is difficult to unambiguously define the defect classification criteria. Numerous different classifications can be found in literature. Generally, based on the time they were formed, wood defects can be categorised as primary (those that occur during the lifetime of the tree), and secondary (those that occur after a tree is felled). Appropriate timber preservation prevents defects from being brought about, resulting in timber degrading, when the wood is stored in open air (forest) or in engineered storage facilities.

As regards the defect type and cause, the following wood defects can be identified: trunk shape defects (excessive taper, crookedness, forks, star shakes, flattening, root swellings, lumps and outgrowths); defects in anatomical structure (knots, non-uniformities in annual rings and the arrangement of fibres, reaction wood, bark pockets, burs, eccentricity, multiple piths, exudation accumulation); defects resulting from external and climatic factors (injuries, necrosis, cankers, cracks, chemical stains); defects due to fungi (blue stain and other stains, rots, brown-reddish colouring); defects caused by pests, primarily by insects (insect channels and holes, tree hollows, resin collection cuts). Different wood properties are needed for various applications of this material. Owing to that, it is possible to use timber that shows some, or small defects. Occasionally, wood defects can turn out to be an advantage, producing a valuable raw material.

Therefore, the term 'wood defects' is ambiguous, and can take on an unexpected meaning. Waviness of fibres is a defect in structural timber and glulam wood, but it becomes an advantage in veneer. In joinery, a change in the natural colour of wood is considered a major drawback, whereas it is of minor importance in those components that are not visible [7-8].

2. Typical defects in structural timber

For the sake of timber classification, including structural sawn timber, the following wood defects: knots, twisted fibres, cracks, shape defects, rots and insect channels are taken into account [5, 7-14].

2.1. Knots

Wood knots appear in the trunk where branches were dropped off or cut off, and where wood grain waved its way around it. They are commonly found in all tree species and are accounted for in wood quality

nicznych i cech naturalnych. Redukują jego zakres stosowania albo czynią go bezużytecznym. Rola wad w jakości drewna jest uwarunkowana typem, rozpiętością oraz lokalizacją. W stosunku do ogromnego zróżnicowania wad i przyczyn ich pojawiania się trudno jest zdefiniować podstawy klasyfikacji, które nie wywołałyby wątpliwości. W literaturze można spotkać różnorodne podziały. Ogólnie wady drewna można ugrupować w zależności od czasu ich wytworzenia jako pierwotne (za życia drzewa) oraz wtórne (po ścięciu drzewa). Odpowiednia konserwacja nie powoduje pojawienia się wad i spadku jakości drewna podczas składowania leśnego i przemysłowego.

Biorąc pod uwagę typ uszkodzeń oraz powód ich ukształtowania, wyodrębnia się następujące rodzaje wad drewna: wady kształtu pnia (zbieżystość, krzywizna, rozwidlenie, listwy mrozowe, spłaszczenie, napływy korzeniowe, zgrubienia oraz narośla); wady budowy anatomicznej (sęki, nierównomierność budowy słoju i przebiegu włókien, drewno reakcyjne, zakorki, zawoje, mimośrodowość, wielordzenność, zgromadzenie wydzielin); wady spowodowane czynnikami zewnętrznymi i klimatycznymi (zranienia, martwice, zabitki, pęknięcia, zabarwienia chemiczne); wady spowodowane grzybami (sinizna i inne zabarwienia, zgnilizny, zaparzenia); wady wywołane przez szkodniki zwierzęce, przede wszystkim owady (chodniki i otwory owadzie, dziuple, spały). Potrzebne właściwości drewna dla wyznaczonych form zastosowań są rozmaite. Pozwala to zagospodarować drewno do celów, gdzie pojawiające się w nim wady są mało znaczące, co więcej mogą być zaletą.

Termin „wady drewna” jest względny, zmienia się w zależności od jego zastosowania. Falistość włókien jest wadą w drewnie konstrukcyjnym i klejonym, a zaletą w drewnie okleinowym. Zmiany naturalnej barwy jest wiodącą wadą w stolarce, natomiast mało ważną w elementach niewidocznych [7-8].

2. Typowe wady drewna konstrukcyjnego

Dokonując podziału drewna, również tarcicy konstrukcyjnej, wyróżnia się takie wady drewna, jak sęki, skręt włókien, pęknięcia, wady kształtu, zgnilizny oraz chodniki owadzie [5, 7-14].

2.1. Sęki

Fragmenty po odpadłych lub obciętych gałęziach, które są wrośnięte w drewno nazywamy sękami. Sęki są powszechne i pojawiają się u wszystkich ich gatunków drzew. W drzewnictwie sęki są objawem

grading. Knots have the shape of stakes, starting at the pith, with diameters increasing towards the tree girth. The size of knots grows towards the top of the tree (Fig. 1).



Fig. 1. Knot distribution over the length of construction and structural sawn timber

Rys. 1. Rozmieszczenie sęków na długości tarcicy budowlano-konstrukcyjnej

In young trees, branches have small diameters. As the tree grows, lower branches die and are dropped off. Their remains form knots in the butt, the lowest part of the stem. They are located at the pith and covered by fresh tissue. Such knots have a small length and diameter. Older trees show knot-free, girth adjacent layer of wood of considerable width. The medium part of the tree trunk has thicker branches and larger knots. They are usually rotten or partly rotten knots, a majority of which are not firmly held by the surrounding tissue. As a result, they fall out when timber is sawn. Most often, knots are formed under bark and manifest themselves as growths on the stem surface, and if the bark is wrinkled and scarred as rosettes and symmetrical transverse bark wrinkles (Fig. 2).

negatywnym. Są podstawą klasyfikacji jakościowej drewna. Mają kształt kołków, zapoczątkowane są w rdzeniu pnia. Ich średnica powiększa się ku obwodowi pnia, podczas gdy wielkość zwiększa się ku wierzchołkowi drzewa (rys. 1).



Fig. 2. Rosette in pine (*Pinus sylvestris* L)

Rys. 2. Róża sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)

U młodych drzew gałęzie mają niewielką średnicę. Podczas wzrostu drzewa, niższe gałęzie obumierają i odpadają. Tworzą one strzępki w odziomkowej części pnia w postaci sęków. Są umiejscowione przy rdzeniu i okalane świeżo narosłymi słojami drewna. Sęki te mają niedużą długość i średnicę. Starsze drzewa posiadają znaczną szerokość wolną od sęków, przyobwodową warstwę drewna. Środkowy fragment pnia charakteryzuje się gałęziami grubszy i większymi sękami. Zazwyczaj są to sęki popsute albo nadpsute oraz w przeważającej części niepołączone z tkanką. W wyniku przetarcia wylatują z pozyskanej tarcicy. Przeważnie odkładają się pod korą. Ich występowanie uwidocznia się w nierównościach na powierzchni pnia (guzy) czy też w zakrzywieniu kory (róże, brewki) – rysunek 2.

The tree crown features branches that grow out from the main trunk. On the trunk lateral side, large diameter, open knots can be seen. They were formed by felling down the tree and cutting off the branches. The majority of knots are sound and attached to the adjacent tree tissue. In accordance with knot arrangement, in felled trees, especially those coniferous ones, the following wood zones are assigned: pith adjacent wood, knotty wood with sound knots that are grown into the surrounding tissue, knotty wood with decayed knots that fall out and clear (knot-free) wood. In conifers, knots form whorls (Fig. 3). That phenomenon is found in trees in which branches grow outward from the pith at the same trunk heights. Such a geometric arrangement is found in pines. In some tree species, e.g. in larches, branches grow unevenly and are not whorled. In addition to knots, burs are also observed. A bur denotes an area of deformed annual rings and grain pattern. In order to encompass a knot, grains deviate from straight direction, producing an arch or elliptical lines. Burs are the bigger, the larger are the diameters of knots. Compared with the adjacent wood, knots are harder, and in coniferous wood, saturated with resin. Consequently, they make it impossible to split and machine wood, especially whittling or cutting is difficult. With respect to wood durability, knot significance depends on its condition and tree species. In species that do not form heartwood, decayed (rotten) knots cause the rotting of the surrounding wood. Knot shape is related to the kind of wood section. In the tangential section, the knot outline is approximately circular in shape, whereas in the radial section, its plan view is band-shaped and tapers towards the pith [5, 7-11, 13].

Poczynając od trzonu korony, pień drzewa jest ugałęziony. Na powierzchni bocznej pnia zauważalne są sęki otwarte, znacznej średnicy, powstałe w wyniku wycięcia drzewa i po ociosaniu gałęzi. W większości sęki te są zdrowe i zespolone z przylegającą tkanką drzewną. Według rozmieszczenia sęków oznacza się w przeciętych drzewach, zwłaszcza iglastych, następujące strefy drewna: drewno przyrdzeniowe, sękate ze zdrowymi sękami zrosniętymi, sękate z zepsutymi sękami wylatującymi oraz drewno bezsęcne. Sęki u gatunków iglastych formują okółki (rys. 3). Dotyczą drzew, gdzie gałęzie rosną promieniście od rdzenia i na jednakowych wysokościach pnia. Taką budowę możemy spotkać u sosny. Istnieją również gatunki, przykładowo modrzew, w których gałęzie narastają nierównomiernie oraz okółki są niewidoczne. Oprócz sęków zaobserwować można także zawoje. Zawój to obszarowe zdeformowanie słoju rocznych i przebiegu włókien. Aby obejść sęki, włókna drzewne odginają się od kierunku prostoliniowego, generując linie łukowate bądź eliptyczne. Zawoje są większe, im większe są przekroje sęków. Sęki są twardsze od przyległego drewna i w drewnie iglastym są przesycone żywicą. Uniemożliwiają łupanie i obróbkę drewna, szczególnie struganie oraz skrawanie. Znaczenie sęka w trwałości drewna jest uzależnione od stanu zdrowotnego i gatunku drzewa. Sęki zepsute (zgniłe) u gatunków beztwardzielowych powodują zgniliznę okolicznego drewna. Kształt sęka jest uzależniony od rodzaju przekroju drewna. Jego zarys na przekroju stycznym ma budowę zbliżoną do koła. Sęk na przekroju promieniowym ma plan pasma zmniejszającego się klinowato w kierunku rdzenia [5, 7-11, 13].



Fig. 3. Example of whorl knot arrangement in round wood of pine (*Pinus sylvestris* L)

Rys. 3. Przykład układu sęków okółkowych w drewnie okrągłym sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)

2.2. Cracks

They are caused by the breaking of tree tissue in sawn timber when timber tensile strength across the fibres, or shear strength along the fibres are exceeded. Primary and desorption cracks can be differentiated, the former ones are found in round wood (Fig. 4).



2.2. Pęknięcia

Pęknięcia pojawiają się przez przerwanie tkanki drzewnej w tarcicy na skutek przekroczenia wytrzymałości drewna na rozciąganie w poprzek włókien lub wytrzymałości na ścinanie wzdłuż włókien. Wyróżnić można pęknięcia pierwotne i desorpcyjne. Pęknięcia pierwotne występują w drewnie okrągłym (rys. 4).



Fig. 4. Pith cracks in pine wood

Rys. 4. Pęknięcia rdzeniowe drewna sosnowego

However, desorption cracks occur when wood is dried. Cracks are categorised as those located in the plane, on the side and on the face [14]. Additionally, cracks are classified as those transferring and non-transferring to the face [11] (Fig. 5). When trees are felled in autumn, the wood is deprived of only a small amount of water, and hence the reason it does not crack. Initial cracks are formed when the more dried layers located near the girth have moisture content that is lower than fibre saturation. Due to pressure from slowly drying central layers, high tensile stress is

Pęknięcia desorpcyjne natomiast powstają podczas suszenia. Określa się pęknięcia na płaszczyźnie, boku i na czole [14]. Ponadto wyróżnia się pęknięcia nieprzechodzące i przechodzące na czole [11] (rys. 5). W okresie jesieni drewno ścięte jest pozbawione nieznacznej ilości wody i nie pęka. Początkowe pęknięcia powstają, gdy bardziej wyschnięte warstwy przyobwodowe będą w przedziale wilgotności niższym od nasycenia włókien. Pod naciskiem wolno schnących warstw środkowych pojawiają się w strefie przyobwodowej duże naprężenia rozciągają-

produced in the outermost zone. The stress value will be higher than wood tensile strength in the direction perpendicular to fibre alignment. Cracks are major defects because they increase the amount of wastage in woodworking. Cracks also cause rots, because they allow the penetration of water and fungal spores. Cracks significantly lower timber strength [7-8].



ce. Wielkość ta przewyższy wytrzymałość drewna na rozciąganie w kierunku prostopadłym do przebiegu włókien. Pęknięcia są istotną wadą, gdyż zwiększają ilość odpadów podczas obróbki. Powodują również powstanie zgnilizny, ponieważ umożliwiają wnikanie wody i zarodników grzybów. Pęknięcia powodują znaczny spadek wytrzymałości drewna [7-8].

Fig. 5. Separate crack measurements in construction and structural sawn timber

Rys. 5. Pomiar pęknięcia mierzonego oddzielnie w tarcicy budowlano-konstrukcyjnej

2.3. Resin pockets

Resin soaked grooves stretch along fibres and are distributed on the verge of growth rings (Fig. 6). They are formed when the tree sways, causing a small tear in the ring, into which resin penetrates. When grading construction and structural sawn timber, resin pockets are categorised as standard cracks [7-8, 11].



2.3. Pęcherze żywiczne

Bruzdy przesyczone żywicą rozciągają się wzdłuż włókien i są rozmieszczone na obrzeżu przyrostów rocznych (rys. 6). Powstają podczas chwiania drzewa, które wywołuje małe rozdarcie słoja. Tam wdziera się żywica. Klasyfikując tarcicę budowlano-konstrukcyjną, pęcherze żywiczne analizuje się jako zwyczajne pęknięcia [7-8, 11].

Fig. 6. Resin pockets in pine sawn timber

Rys. 6. Pęcherze żywiczne tarcicy sosnowej

2.4. Stains

They involve the modification of the typical colouring of wood due to the action of abiotic (atmospheric conditions, chemical compounds) or biotic (fungi – blue stain) factors. Stains can result from the darker hues of fungal hyphae found in the wood. Trees that normally do not produce heartwood, under specified conditions, generate false heartwood (Fig. 7). Normal heartwood is related to tree aging and is formed in a certain age interval. False heartwood, however, is associated with pathological factors (fungal penetration and decomposition) and external circumstances (frost impact and air penetration into the tissues) [8].

2.4. Zabarwienia

Zabarwieniami określamy modyfikację zwyczajnej barwy drewna na skutek działań czynników abiotycznych (czynniki atmosferyczne, związki chemiczne) czy też biotycznych (grzyby – sinizna). Powodem tych zmian może być ciemniejsza barwa występujących w drewnie strzępek grzybni. Drzewa beztwardzielowe produkują w wyznaczonych warunkach fałszywą twardziel (rys. 7). Twardziel normalna jest wyrazem starzenia i powstaje w określonym przedziale wiekowym. Natomiast fałszywa twardziel pojawia się pod wpływem czynników patologicznych (penetracja i rozkład grzybów) albo czynników zewnętrznych (wpływ mrozu i przenikanie powietrza do wewnętrznej części tkanek) [8].



Fig. 7. *False heartwood*

Rys. 7. *Falszywa twardziel*

Stains are permitted in construction and structural sawn timber. Blue stain is allowable, and it does not lower the strength class. Fungi causing blue stains have dark brown hyphae. Fungal cells that can be seen through the wood produce grey-blue tint. Other fungal species, e.g. those producing red-rusty colour, release dyes that can be found in the melullary ray cells. Blue stain colour can range from blue to green and black (Fig. 8). Despite being a serious defect in woodworking, it does not significantly affect wood structural functions. Blue stain has a negative effect on wood aesthetics and it is a proof of poor preservation conditions. Stains in sawn timber are detrimental to appearance, consequently the demand for such product is reduced [7-8, 11].

Zabarwienia są dopuszczalne w tarcicy budowlano-konstrukcyjnej. Obecność sinizny jest dopuszczalna i nie zmniejsza klasy wytrzymałościowej. Grzyby wywołujące siniznę mają brunatne zabarwione strzępki. Komórki przeświecają przez drewno, dając szaroniebieskie zabarwienie. Inne gatunki grzybów wydzielają barwniki występujące w komórkach promieni rdzeniowych. Można tutaj wymienić grzyby wywołujące czerwień drewna. Sinizna ma kolor od niebieskiego do zielonocznego (rys. 8). Jest zasadniczą wadą w stolarstwie, lecz nie odgrywa znaczącej roli w drewnie konstrukcyjnym. Sinizna wpływa ujemnie na estetykę drewna i świadczy o złych warunkach konserwacji. Zabarwienia występujące w tarcicy mają wpływ na negatywną ocenę estetyczną drewna, zmniejszając popyt na sprzedaż [7-8, 11].



Fig. 8. *Blue stain in construction and structural sawn timber and round timber*

Rys. 8. *Sinizna tarcicy budowlano-konstrukcyjnej i drewna okrągłego*

2.5. Rots

They result from the action of fungi that break down cell walls. The first stage of fungal attack leads to a discolouration and a minimal deterioration of mechanical properties. Such a phenomenon is called hard rot and is permitted in lower grade construction and structural sawn timber. Hard rots can be manifested as is the reddish tinge of sapwood and heartwood. Sapwood reddish colour is a component rot, which is most often found in spruce wood. The rot has the form of needle-like threads running from the girth towards the pith. Heartwood reddish colour features the first stage of internal rot. It occurs in living coniferous trees. The latter stage of fungal growth leads to hard rot change into soft rot. The wood degraded by soft rot has lost its structure and has been rendered useless. The soft rot stage involves the destruction of cell walls, reduction in wood density and deterioration of mechanical properties. In the final stage, wood turns into fibrous or powdery mass. Rots can be located at different sites. The basidiomycete fungus *Fomes annosus* Karst. or fir-trunk *Trametes Trametes Pini* Fr. are found in the heartwood near the pith, whereas honey fungus *Armillaria mellea* Vahl. – in the outermost layer of sapwood. Sawn timber with rots is considered to be a discard [7-8, 11].

2.6. Insect channels

Some larvae and nymphs feed on tree tissue thus destroying wood. The damages to wood have a form of bored channels that show different diameters, shapes and arrangement. With respect to the depth, insect channels can be classified as shallow (up to 5 mm) and deep (above 5 mm). Taking the size into account, deep insect channels can be small (diameter smaller than 3 mm, circular cross-section) and large (diameter greater than 3 mm, circular or oval cross-section). The wood of coniferous trees is attacked by the following insects: large timberworm beetles, striped ambrosia beetle, pine sawyer beetles, longhorn beetles and giant woodwasps. Small insect channels are the most detrimental because of their massive occurrence. In sawn timber, the presence of xylophagous insects is not allowed [7-8, 11, 14].

2.7. Wanes

Those defects are commonly associated with the machining of sawn timber (Fig. 9). Sawn timber with a single wane, or waness, does not have perpendicular edges. A part of the sawn timber edge is missing. Wane can be found along one length, or two lengths of a piece

2.5. Zgnilizna

Zgnilizna jest wywołana przez niszczące ściany komórkowe grzybów. Pierwszym etapem działalności grzybów jest zmiana barwy drzewa z minimalnym obniżeniem właściwości mechanicznych. Taką zgniliznę określa się jako twardą. Jest ona dopuszczalna w gorszej klasie tarcicy budowlano-konstrukcyjnej. Istotną formą zgnilizny twardej jest czerwień bielu i twardzielu. Czerwień bielu to zgnilizna składowa, która powstaje przeważnie w drewnie świerkowym. Ma kształt iglastych smug, poprowadzonych od obwodu do rdzenia. Czerwień twardzieli obejmuje pierwszą fazę zgnilizny wewnętrznej. Tworzy się u żywych drzew iglastych. Późniejszy etap wzrostu grzybów sprawia zmianę zgnilizny twardej w zgniliznę miękką. Drewno obciążone zgnilizną miękką jest pozbawione zwyczajnej budowy i przydatności. W fazie zgnilizny miękkiej dokonuje się zniszczenie ścian komórkowych, spada gęstość drewna oraz osłabiają się właściwości mechaniczne. W ostatnim etapie rozwoju zgnilizny miękkiej drewno rozpada się na włóknistą lub proszkową masę. Rozmieszczenie zgnilizny jest różnorodne. Huba korzeniowa *Fomes annosus* Karst. lub wrośniak sosnowy *Trametes Pini* Fr. występują na przyrdzeniowej strefie twardzieli a opieńka miodowa *Armillaria mellea* Vahl. – przyobwodowej warstwie bielu. Tarcicę budowlano-konstrukcyjną mieszczącą zgniliznę uznaje się jako odrzut [7-8, 11].

2.6. Chodniki owadzie

Chodniki owadzie niszczą tkankę drzewną poprzez żerowanie larw oraz postaci doskonałych. Zniszczenia posiadają kształt żłobionych chodników o rozmaitej średnicy, kształcie i planie. W odniesieniu do głębokości można wyróżnić chodniki płytkie (do 5 mm) i głębokie (powyżej 5 mm). Biorąc pod uwagę wielkość, głębokie chodniki owadzie rozkładają się na małe (średnica mniejsza niż 3 mm, kolisty plan przekroju) oraz duże (średnica większa niż 3 mm, okrągły lub owalny plan przekroju). Drewno iglaste charakteryzuje się występowaniem rytli, drwalników, żerdzianków, ściągów, trzpienników. Najbardziej niebezpieczne są chodniki małe, ponieważ pojawiają się masowo. Obecność ksylofagów w tarcicy jest niedopuszczalna [7-8, 11, 14].

2.7. Obliny

Obliny są uwarunkowane wadami przetarcia tarcicy obrzynanej (rys. 9). Tarcica z pojedynczą obliną albo oblinami nie jest ostrokrawężna. Fragment tarcicy jest zaokrąglony. Oblina pojawia się wzdłuż jednej krawędzi lub wzdłuż dwóch. Powierzchnie

of timber. The absence of wood is summed if two wanés are placed together in the plane, or on the side [7, 11].



Fig. 9. Measurement of a single wane in pine sawn timber
Rys. 9. Pomiar obliny pojedynczej tarcicy sosnowej

2.8. Twisted fibres

The phenomenon involves an asymmetrical arrangement of fibres with respect to the longitudinal axis of round timber or sawn timber. In particular, twisted fibres can be seen in the outermost part of the trunk. The occurrence of twisted fibres in sawn timber is demonstrated by the presence of transverse cracks. Round timber and tangential surfaces in sawn timber show appropriate twist of fibres, whereas the radial surfaces show apparent fibre twisting. The latter is caused by the splitting of excessively tapered wood. It is most commonly found in sawn timber obtained from the lowest and the uppermost part of the trunk [7, 11].

2.9. Curves and crookedness

Sawn timber which is not curved is in the shape of a rectangular prism. All irregularities from the ideal shape are termed curves. The defects originate from milling, improper storage and non-uniform shrinkage of wood when it is seasoned. Curves can also result from the occurrence of other defects such as large knots on the edges, and non-rectilinear alignment of fibres. Curves can include the following forms: bows, cups, twists and warps. Trunk crookedness can be found in all species of trees, especially in deciduous trees. In round timber, deductions must be made in woodworking when logs are excessively crooked, which produces excessive wastage (Fig. 10). High crookedness lowers timber quality, and degraded timber is used for fuel [7-8, 11].

dwóch sztuk oblin na płaszczyźnie bądź na boku sumuje się [7, 11].



2.8. Skręt włókien

Skręt włókien jest to asymetryczne ułożenie włókien do podłużnej osi drewna okrągłego czy tarcicy. Uwidacznia się ono w szczególności w przyobwodowej strefie pnia. Skręt włókien w tarcicy dowodzi ukośne pęknięcie. Drewno okrągłe i powierzchnie styczne tarcicy odznaczają się właściwym skrętem włókien, natomiast powierzchnie promieniowe wyróżniają się pozornym skrętem włókien. Pozorny skręt włókien jest wywołany rozcięciem zbieżystego drewna. Pojawia się głównie w tarcicy otrzymanej z kłód odziomkowych i wierchołkowych [7, 11].

2.9. Krzywizny

Tarcica bez wady krzywizny ma postać prostopadłościanu. Różnorakie odstępstwa od tej formy nazywa się krzywizną. Kształtuje się ona podczas przetarcia, nieodpowiedniego składowania i niejednorodnego kurczenia się drewna w czasie wysychania. Krzywizny są również spowodowane występowaniem innych wad, takich jak duże sęki na krawędziach i nieprostoliniowego układu włókien. Wyodrębnia się krzywiznę podłużną płaszczyzn, krzywiznę podłużną boków, krzywiznę poprzeczną płaszczyzn, wichrowatość. Krzywizna występuje u wszystkich gatunków drzew, w szczególności u drzew liściastych. W drewnie okrągłym krzywizna zmniejsza wydajność materiałową przy obróbce (rys. 10). Duża krzywizna obniża jakość drewna, przeznaczając go na opał [7-8, 11].



Fig. 10. Crookedness in round wood

Rys. 10. Krzywizna drewna okrągłego



2.10. Growth of sclerenchyma fibres

Reaction wood is a tissue characterised by modified structure and enhanced strength. It shows increased latewood in annual rings. Reaction wood is formed in trees that are inclined, bent due to unidirectional winds, a cap of snow, landslide, or one-sided light exposure. In coniferous trees, reaction wood is termed sclerenchyma fibres. In round timber cross-section, reaction wood can be seen as a brown-reddish zone of the annual ring. It occurs in trunks and branches of living coniferous trees, in the compression zone. The annual growth of the tree can rearrange the trunk cross-section geometry. Sclerenchyma fibres can be formed on only one occasion (narrow type), or for many years (wide type). The coil cross-section is circular in shape, twice thicker, with 20%-40% shorter length and has a higher content of lignin. That results in greater density and compression strength, accompanied by reduced tensile strength and impact resistance. Additionally, shrinkage and swelling are increased. The growth of sclerenchyma fibres usually occurs in spruce and fir [7-8, 11].

3. Summary

The study presents a thorough analysis of basic and major defects in structural timber with respect to strength grading. Due to investigations, it was possible to exhaustively examine the impact of defects on mechanical properties of construction and structural sawn timber. In addition to research outcome, the observation have a practical application. The detailed discussion of wood defects can be used as guidance in wood grading.

2.10. Twardzica

Drewno reakcyjne obejmuje tkankę o zmodyfikowanej budowie i podwyższonej wytrzymałości. Charakteryzuje się powiększoną strefą drewna późnego w słojach rocznych. Drewno reakcyjne wykształca się w drzewach pochylonych i wygiętych pod wpływem jednokierunkowych wiatrów, okiści śnieżnej, osunięcia się gruntu albo jednostronnego naświetlenia. Drewno reakcyjne drzew iglastych określa się twardzicą. Drewno reakcyjne zauważalne na przekroju poprzecznym drewna okrągłego w postaci czerwono-brunatnej strefy słoja rocznego. Pojawia się w pniu i gałęziach rosnących drzew iglastych w części ścisanej. Co roku wzrastające drzewo może przebudować przekrój pnia. Twardzica jest formowana jednokrotnie (wąska) bądź wielość lat (szeroka). Przekrój poprzeczny cewki jest kołowy, dwa razy grubszy, o długości 20-40% krótszej oraz większej zawartości ligniny. Powoduje to zwiększenie gęstości oraz wytrzymałości na ściskanie przy zmniejszeniu wytrzymałości na rozciąganie i udarowości, a także zwiększenie kurczliwości i pęcznienia. Zazwyczaj twardzica występuje w świerku i jodle [7-8, 11].

3. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wad drewna wyczerpująco przedstawia podstawowe i najważniejsze, w rozumieniu sortowania wytrzymałościowego, wady drewna konstrukcyjnego. W efekcie badań uzyskano gruntowne rozpoznanie wpływu defektów na właściwości mechaniczne tarcicy konstrukcyjno-budowlanej. Dokonane obserwacje, oprócz wymiaru badawczego, mają aspekt praktyczny. Szczegółowe opisy i analogie mogą być użyteczne przy klasyfikacji drewna konstrukcyjnego.

References

- [1] Kossakowski P.G.: *Influence of anisotropy on the energy release rate G_I for highly orthotropic materials*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 45(4), Warszawa 2007, s. 739-752.
- [2] Kozakiewicz P.: *Fizyka drewna w teorii i zadaniach*. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2003.
- [3] Rudziński L.: *Naprawy i wzmocnienia konstrukcji drewnianych*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2000.
- [4] Wdowiak A.: *Assessment of technical condition of wooden structures*. Proceedings of TRANSCOM 2015, SECTION 7- CIVIL ENGINEERING, s. 326-332.
- [5] Wdowiak A.: *Strength and structural properties of structural timber*. Structure and Environment Vol. 8 (2), s. 103-108.
- [6] Wdowiak A., Kroner A.: *Wpływ niejednorodności struktury zginanych belek z drewna klejonego na efekt ich wzmocnienia*. Materiały Budowlane 1/2017, s. 87-89.
- [7] Kozakiewicz P., Krzosek S.: *Inżynieria materiałów drzewnych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2013.
- [8] Krzysik F.: *Nauka o drewnie*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1975.
- [9] Krzosek S.: *Wytrzymałościowe sortowanie polskiej sosnowej tarcicy konstrukcyjnej różnymi metodami*. Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2009.
- [10] Wdowiak A.: *Using the visual method to sort polish pine structural sawn timber with respect to strength*. Czasopismo Techniczne 2-B/2016, s. 219-224.
- [11] PN-D-94021:2013-10 – Tarcica konstrukcyjna iglasta sortowana metodami wytrzymałościowymi – wersja polska.
- [12] PN-EN 336:2013-12 Drewno konstrukcyjne – Wymiary, odchyłki dopuszczalne – wersja angielska.
- [13] PN-EN 14081-1:2016-03 Konstrukcje drewniane – Drewno konstrukcyjne sortowane wytrzymałościowo o przekroju prostokątnym - Część 1: Wymagania ogólne – wersja angielska.
- [14] PN-EN 844-9:2002 Drewno okrągłe i tarcica – Terminologia – Część 9: Terminy dotyczące cech tarcicy – wersja polska.



environment
environment

MACIEJ HAJDUKIEWICZ¹

IHOR ROMANYSHYN²

Kielce University of Technology

¹ e-mail: mhajdukiewicz@tu.kielce.pl

² e-mail: iromanyshyn@tu.kielce.pl

AN ACCURACY ASSESSMENT OF SPOT HEIGHTS ON DIGITAL ELEVATION MODEL (DEM) DERIVED FROM ALS SURVEY: CASE STUDY OF ŁYSICA MASSIF

OSZACOWANIE DOKŁADNOŚCI PUNKTÓW WYSOKOŚCIOWYCH NA NMT MASYWU ŁYSICY Z POMIARÓW ALS

Abstract

The paper presents an analysis of ALS – derived DEM (created as part of ISOK project) of Łysica massif in Łysogóry range, Poland. The contour map, slope map, and cross sections of the massif were derived of DEM, and compared to reference data – an earlier cartographical elaborations, including topographical map 1:10000 and forest economical map 1:5000, and to field survey, conducted in 2016 sep. using GNSS and differential leveling methods. A high accuracy of DEM was confirmed, corresponding to requirements of ISOK project. The surveys revealed, that real elevations of the tops of Łysica massif vary from the values shown on topographical map 1:10000. According to precise GNSS and leveling surveys, the main top is higher by 1.2 m (GNSS measurement 613.4 m a.s.l., DEM measurement 613.14 m a.s.l.), and the eastern top, named Skala Agaty, being higher by 5 m (GNSS measurement 613.7 m a.s.l., DEM measurement 613.4 m a.s.l.), and this top is actual highest point of Łysica massif and thus Świętokrzyskie mountains.

Keywords: Airborne Laser Scanning, Digital Elevation Model, GNSS positioning

Streszczenie

W artykule opisano analizę NMT otrzymanego z pomiarów ALS (opracowanego w ramach projektu ISOK) dla masywu Łysicy w Górach Świętokrzyskich. Mapa warstwowa, mapa spadków oraz profil poprzeczny otrzymane z NMT zostały porównane z wcześniejszymi opracowaniami, takimi jak mapa topograficzna w skali 1:10000, leśna mapa gospodarcza w skali 1:5000 oraz z wynikami pomiarów terenowych przeprowadzonych w 2016 roku metodą GNSS RTK i niwelacji geometrycznej. Potwierdzono wysoką dokładność NMT, odpowiadającą wymogom projektu ISOK. Pomiarzy wykazały również, że rzeczywiste wysokości wierzchołków masywu Łysicy różnią się od wartości podawanych na mapach topograficznych w skali 1:10000. Według dokładnych pomiarów GNSS oraz niwelacji geometrycznej, wierzchołek główny jest wyższy o ponad 1,2 m (pomiar GNSS: 613,4 m n.p.m., pomiar na NMT: 613,14 m n.p.m.), a wschodni wierzchołek (Skala Agaty) jest wyższy o ponad 5 m (pomiar GNSS: 613,7 m n.p.m., pomiar na NMT: 613,4 m n.p.m.), co oznacza, że jest on faktycznie najwyższym wierzchołkiem masywu Łysicy, a tym samym również Gór Świętokrzyskich.

Słowa kluczowe: lotniczy skaning laserowy, numeryczny model terenu, pomiary GNSS

1. Introduction

Łysica is the highest peak of the Świętokrzyskie Mountains, situated in the western part of the Łysogóry ridge. Łysica massif is extended from Krajeńska Pass in the west to Kakonińska Pass in the east, and two tops could be marked on it: the main

1. Wstęp

Łysica jest to najwyższy szczyt Gór Świętokrzyskich, leżący w zachodniej części pasma Łysogór. W masywie Łysicy, leżącym pomiędzy Przełęczą Krajeńską na zachodzie a Przełęczą Kakonińską na wschodzie, oprócz wierzchołka głównego wyróżnia się rów-

(western) top, and eastern top, named Skala Agaty, or Zaczysko. Due to contemporary topographic maps, the elevations of these tops differ from the values, that one could notice from an earlier cartographic studies. The aim of the research was to explain these inconsistency and to specify the elevation of each top using the latest airborne laser scanning (ALS) survey of this area, with assessment of the ALS-derived digital elevation model (DEM), using GNSS survey and differential leveling methods.

The geological structure of the Łysica massif is the same as the Łysogóry ridge [9]. The basement is dominated by hard and resistant to weathering quartzite of Upper Cambrian age. It touches less resistant slates of Ordovician age on the northern slopes and limestones, marls of Devonian age on the south. The lower parts of the slopes are covered by postglacial loess-like sediments of Pleistocene age. Topline is compatible with direction of rock layers, northern slopes are consistent with their falls, while southern are perpendicular to them. The relief is typical for low mountains. Denivelation exceeds 300 m slightly, the slope angle is in the range of 10 to 30 degrees. The dominant geomorphological processes are frost airing in quartzite and water surface erosion in debris cover. The intensity of these processes is currently low, that could be evidenced by the lack of the landforms typical for erosion in the upper part of ridge, and observable process of boulder fields overgrowing by the forest. Łysogóry area is nowadays considered as tectonically stable [11]. Therefore, one could assume, that the geomorphological processes should have not affect the results of height survey, carried out on this area in the last 150 years.

2. The comparison of earlier surveys and the ALS survey of ISOK project

The earliest surveys in Łysogóry ridge took place in the first half of the nineteenth century [1]. In the years 1828-1829 on Łysiec (present name: Święty Krzyż) mount the triangulation tower was located. On the later maps of nineteenth and beginning of twentieth century different elevations of Łysica can be noticed: 612 m a.s.l. (Map of the Austro-Hungarian monarchy of 1910 [4]) and 611.5 m a.s.l. on the German map of 1914 [3], and the military map of Poland ed. WIG of 1936 [7]. The signature applied indicates that the specified elevation refer to the point of the triangulation net, therefore it may not match exactly the highest point of the terrain. In Austrian map mentioned earlier even

niez wierzchołek wschodni, czyli tzw. Skalę Agaty. Podawane na aktualnych mapach topograficznych wysokości tych wierzchołków różnią się od wartości na starszych opracowaniach kartograficznych. Celem pracy było wyjaśnienie tych kontrowersji i uściślenie wysokości poszczególnych wierzchołków w oparciu o najnowsze pomiary wysokościowe tego terenu, przeprowadzone metodą laserowego skaningu lotniczego (ALS), z jednoczesną ich weryfikacją pomiarami terenowymi, metodą GNSS i niwelacji geometrycznej.

Budowa geologiczna masywu Łysicy nie odbiega od budowy całego grzbietu Łysogór [9]. W podłożu dominują twarde i odporne na wietrzenie kwarcyty wieku górnokambryjskiego. Na stokach północnych graniczą one z mniej odpornymi łupkami ordowickimi, zaś na południu wapieniami, marglami i łupkami dewońskimi. Dolne partie stoków pokryte są ponadto peryglacialnymi osadami pyłowymi i gliniastymi wieku plejstocenijskiego. Linia grzbietu jest zgodna z biegiem warstw skalnych, północne stoki są zgodne z ich upadem, zaś południowe są do niego prostopadłe. Rzeźba terenu jest typowa dla gór niskich. Deniwelacje nieznacznie przekraczają 300 m, spadki zboczy zawierają się w przedziale od 10 do 30 stopni. Dominujące procesy geomorfologiczne to wietrzenie mrozowe w kwarcytach i erozja powierzchniowa pokryw zwietrzelinowych. Intensywność ich jest obecnie niewielka, o czym świadczy brak form erozyjnych w górnych partiach grzbietu i możliwy do zaobserwowania proces zarastania gołoborzy przez las. Obszar Łysogór jest obecnie uznawany za tektonicznie stabilny [11]. Można zatem przyjąć, że procesy geomorfologiczne nie powinny mieć wpływu na wyniki pomiarów wysokościowych prowadzonych na tym terenie w ciągu ostatnich 150 lat.

2. Dane pomiarowe ALS na tle dotychczasowych opracowań

Najwcześniejsze pomiary w Łysogórach miały miejsce w pierwszej połowie XIX wieku [1]. W latach 1828-1829 na Łyścu (obecnie Łysa Góra) zlokalizowana była wieża triangulacyjna. Z późniejszych opracowań kartograficznych wynotować można różne wysokości Łysicy: 612 m n.p.m. na mapie austro-węgierskiej z 1910 roku [4] oraz 611,5 m n.p.m. (mapa niemiecka z 1914 roku [3], mapa polska wyd. WIG z 1936 roku [7]). Zastosowane sygnatury wskazują, że podana wysokość stosuje się do punktu osnowy, zatem nie musi się dokładnie pokrywać z najwyższym punktem terenu. Na wspomnianej mapie austriackiej brak jest nawet informacji o nazwie

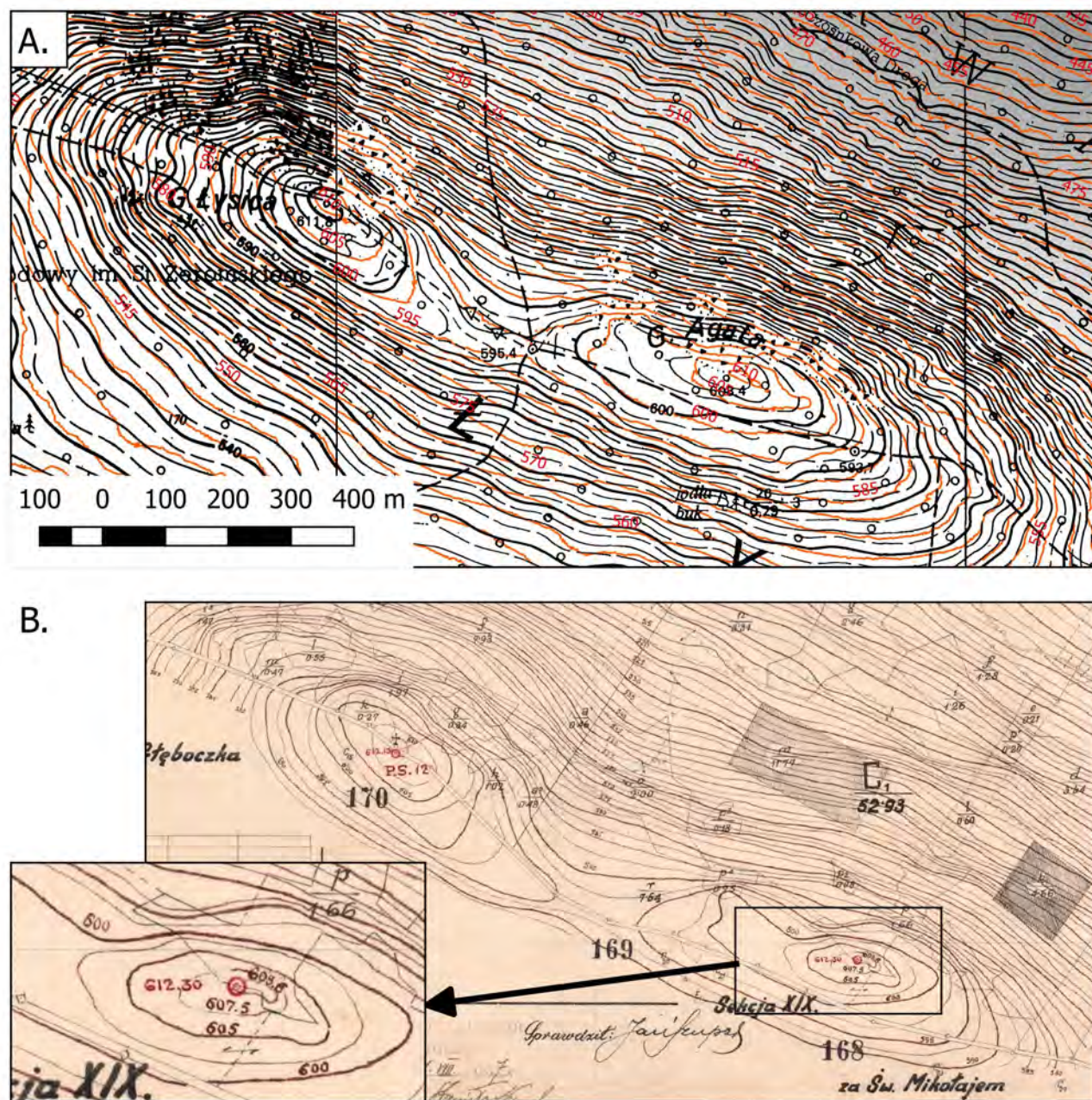


Fig. 1. Comparison of the contours and spot heights on the maps: topographic 1:10000 (black, contour A), contour map of DEM (orange, contour A); and economical forest map 1:5000 (B)

Rys. 1. Porównanie warstw i punktów wysokościowych na mapach topograficznych 1:10000 (czarne warstwice, część A), warstw z NMT (pomarańczowe warstwice, część A) oraz na leśnej mapie gospodarczej 1:5000 (część B)

summit name information is omitted. The date of issue of WIG military maps coincides with the preparation of detailed topographic survey of the Łysica massif for the needs of forest economic map, which shows that the elevation of the tops are as follows: western one 612.13 m a.s.l. and eastern one (Skała Agaty) 612.3 m a.s.l. [2]. Eastern top would therefore be 0.17 m higher from the west one, which is nowadays considered as the major one. Part of this map scanned

góry. Data wydania mapy WIG zbiega się w czasie ze sporządzeniem zdjęcia topograficznego masywu Łysicy na potrzeby leśnej mapy gospodarczej, z którego wynika, że wysokości wierzchołków wynoszą odpowiednio: zachodni 612,13 m n.p.m. i wschodni 612,3 m n.p.m. [2]. Wschodni wierzchołek (Skała Agaty) miałby zatem być nieco wyższy (o 17 cm) od zachodniego, uznawanego za główny. Współczesne mapy topograficzne w skali 1:10000 [5] podają jako

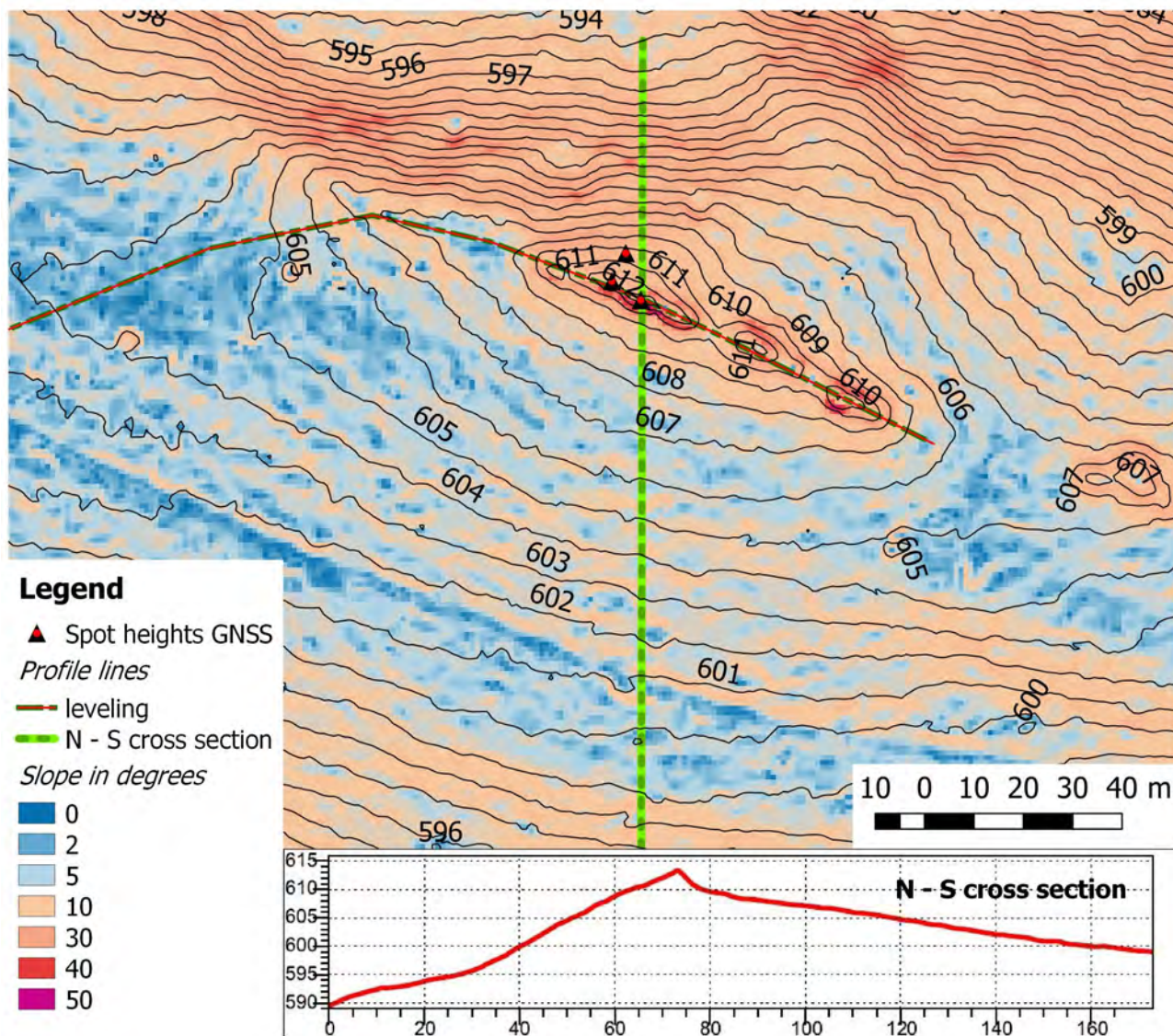


Fig. 2. The contour map, the slope map, and the cross section of the Skala Agaty top, derived from DEM of ALS survey of Łysica massif

Rys. 2. Mapa warstwiczna, mapa spadków oraz profil poprzeczny Skały Agaty otrzymany z NMT masywu Łysicy pochodzącego z pomiarów ALS

is shown in Figure 1 – contour B, in comparison to modern topographic map 1:10000 and digital terrain (elevation) model (DEM). This DEM is the effect of latest (2014) ALS survey of research area, made as part of information system for land protection project (pol. ISOK), and this data was obtained from Centre of Geodesy and Cartography Documentation (pol. CODGiK). Modern topographic maps at a scale of 1:10000 [5] shows the elevations of the tops: 611.8 m a.s.l. (western one) and 608.4 m a.s.l. eastern one (Skała Agaty), so the difference in elevation between them is 3.4 m in favor of western one (Fig. 1 – contour A). The contours at map 1:10000 differ from the ones on the map 1:5000, and the ones derived from DEM.

wysokości wierzchołków: 611,8 m n.p.m. (zachodni – główny) i 608,4 m n.p.m. (Skała Agaty), czyli różnica wysokości pomiędzy nimi wynosi 3,4 m na korzyść wierzchołka głównego. Porównanie rysunku warstwiczowego współczesnej mapy topograficznej oraz warstwicy o cięciu 0,5 m, wygenerowanych z numerycznego modelu terenu, przedstawiono na rysunku 1 – część A, zaś na rysunku 1 – część B widnieje fragment mapy warstwicznej z wyrysów leśnej mapy gospodarczej w skali 1:5000 z 1935 roku. Jak widać, przebieg warstwicy różni się nieznacznie na całym obszarze, a największe widoczne różnice można zaobserwować wokół wierzchołka Skały Agaty.

The biggest differences are visible in the surroundings of Skała Agaty top.

Remarkably, none of the maps described contain the signature indicating the presence of large rocks on top of Skała Agaty, but only boulder fields. It seems to be a shortcoming, because this top (Rock of Agatha) is actually a big and steep rock outcrop with a length of approximately 50 m, broken from the south with a 4 meters high wall, that is a distinctive landmark, worthy of the designation on the map. On the DEM prepared from ALS surveys this landform is indicated as significant one (Fig. 2). Contour map and terrain cross-section taken along the line N-S, shows also steepness of south edge of the outcrop. Analysis of DEM indicates also the top elevation of 613.4 m a.s.l., thus it is slightly higher than the western top measured simultaneously as 613.14 m a.s.l. Both of them are higher than reported on modern topographic map, and closer to the elevations shown on the map of 1935. However, in accordance with the requirements for the ISOK project, the part of which the ALS air raid was done, the admissible error is 0.3 m for woodland area [8]. Thus, the ALS surveys required field survey verification.

3. An accuracy assessment of DEM with GNSS survey and differential leveling

In order to verify the ALS surveys, field measurements in September and November 2016 were conducted. First stage was to survey with RTK GNSS technique both tops of Łysica and set of points identifiable on the DEM; the second one was the differential leveling between tops. The surveys were made according to standards for detailed elevation network [10]. In addition, the GNSS RTK survey of selected points around Łysica Massif was performed, in order to estimate the accuracy of the RTK GNSS measurement technique, related to an existing geodetic elevation network for this region. Both of the tops of Łysica, are wooded significantly, so visibility of GNSS satellites is limited. Therefore, the measurements were completed in September (at the same time as the differential leveling) and in November, when conditions are much better because of lack of leaves.

The two-band receiver Sokkia GRX-1 was used for this survey. Measurement reliability of this equipment is provided by the ability of picking up beacons on 72 channels GPS and GLONASS systems, built-in modem GPRS for receiving RTK corrections. An

Model terenu opracowany został z pomiarów ALS przeprowadzonych w 2014 roku w ramach projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju). Został on udostępniony do badań przez Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK). Na żadnej z wcześniej omawianych map nie natrafiono na sygnatury informujące o obecności dużych skał na wierzchołku Skały Agaty (jedynie gołoborza), co wydaje się być niedociągnięciem, gdyż tworząca ten wierzchołek niesymetryczna grzęda skalna o długości ok. 50 m urywa się od strony południowej ścianką o wysokości ponad 4 m i stanowi bardzo charakterystyczny punkt orientacyjny zasługujący na oznaczenie na mapie. Na modelu terenu sporządzonym z pomiarów ALS forma ta zaznacza się bardzo wyraźnie, co widać na rysunku warstwicowym i profilu terenu sporządzonym wzdłuż linii N-S (rys. 2). Analiza modelu terenu wskazuje również, że wierzchołek ten ma wysokość 613,4 m n.p.m., i jest nieco wyższy od wierzchołka głównego, którego wysokość wynosi na tym modelu 613,14 m n.p.m. Obie te wysokości są większe niż podawane na współczesnej mapie topograficznej. Trzeba jednak zaznaczyć, że dopuszczalny błąd pomiarowy wg wymagań dla projektu ISOK, w ramach którego sporządzono model, wynosi dla terenów zalesionych 0,3 m [8], zatem pomiary przeprowadzone na tym materiale wymagały weryfikacji terenowej.

3. Analiza dokładności NMT w oparciu o pomiary GNSS i niwelację geometryczną

W celu zweryfikowania wysokości odczytanych z NMT przeprowadzono we wrześniu i listopadzie 2016 roku pomiary terenowe, na które składały się: pomiar techniką GNSS RTK obu wierzchołków Łysicy i punktów charakterystycznych możliwych do zidentyfikowania na NMT oraz niwelacja techniczna pomiędzy wierzchołkami wykonana wg standardu dla sieci szczegółowej osnowy wysokościowej [10].

Oba wierzchołki Łysicy, ze względu na zalesienie, znajdują się na terenie z ograniczoną widocznością satelitów. W związku z tym pomiary GNSS RTK wykonano zarówno we wrześniu (jednocześnie z niwelacją geometryczną) i w listopadzie, kiedy ze względu na brak liści są znacznie lepsze warunki do pomiarów satelitarnych. Dla pomiarów wykorzystano dwuczęstotliwościowy odbiornik Sokkia GRX-1 z możliwością odbioru sygnałów nawigacyjnych systemów GPS i GLONASS, wbudowanym modemem GPRS dla odbioru poprawek RTK i dokładnością pomiaru w trybie RTK ± 10 mm + 1 p.p.m. współrzędnych poziomych i ± 15 mm + 1 p.p.m. wysokości [6]. Pomiar wykonano z wyko-

accuracy of measurement in RTK mode is about ± 10 mm + 1 p.p.m. for horizontal coordinates and ± 15 mm + 1 p.p.m. for vertical ones [6]. The measurement was performed using RTK hotfix received from network of reference stations, with vertical reference level of Kronstadt 86, and horizontal reference system PL 2000 zone 7. The actual vertical measurement accuracy in this case is assessed for 0.03-0.1 m, depending on conditions (vegetation condition, number of satellites visible). The results can be found in Table 1. According to these measurements eastern top is 0.35 m higher than western one. Both of the tops are higher than on the topographical map and the DEM of ALS data.

Table 1. GNSS RTK measurement of main (G. Łysica) and eastern (G. Agata) tops of Łysica massif

Tabela 1. Wyniki pomiarów GNSS RTK wierzchołków masywu Łysicy – wschodniego (Góra Łysica) i zachodniego (Góra Agata)

Point	X_{2000} [m]	Y_{2000} [m]	H_{K86} [m a.s.l.]	Δh_{RTK}
G. Łysica (western top)	5639599.72	7492730.88	613.35	0.35
G. Agata (eastern top)	5639310.50	7493383.60	613.70	

Differential leveling measurements were made using Sokkia SDL-50 leveler and a set of extensible code rods of aluminium. As turning points, the leveling footplates were used. The measurement results of closed leveling traverse can be found in Table 2.

rzystaniem poprawek z sieci stacji referencyjnych, a jego rzeczywistą dokładnością wysokościową można oszacować na 0,03-0,1 m, w zależności od warunków. Wyniki pomiaru znajdują się w tabeli 1. Pomiar wykazały różnicę wysokości 0,35 m pomiędzy obu wierzchołkami, przy czym wierzchołek wschodni jest wyższy.

Pomiary niwelacyjne zostały wykonane w zamkniętym ciągu niwelacji geometrycznej z pomiarem ze środka, przy użyciu niwelatora kodowego Sokkia SDL-50 i kompletu rozsuwanych aluminiowych łąt kodowych. Jako punkty pośrednie ciągu wykorzystano żabki niwelacyjne. Wyniki pomiaru zamkniętego ciągu niwelacyjnego znajdują się w tabeli 2.

Table 2. Differential leveling of main (G. Łysica) and eastern (G. Agata) tops of Łysica massif

Tabela 2. Niwelacja geometryczna pomiędzy wierzchołkami masywu Łysicy – zachodnim (Góra Łysica) i wschodnim (Góra Agata)

Direction	Δh [m]	$\Sigma \Delta h$ [m]	L [km]	$\Sigma \Delta h_{dop}$ [m]
G. Łysica (western top) – G. Agata (eastern top)	0.365	-0.005	1.605	0.008
G. Agata (eastern top) – G. Łysica (western top)	-0.370			
G. Łysica – G. Agata	0.368			

As can be seen from the table, the deviation of the closure of the leveling traverse is 5 mm, which satisfies the conditions of admissible deviation (signed as $\Sigma \Delta h_{dop}$) for detailed geodetic reference network if string leveling length is $L = 1.605$ km, according to standards [10]. The difference of Łysica tops elevation, calculated on the basis of the geometric leveling is about 2 cm higher than specified on the basis of measurements by GNSS RTK (shown in Table 3). Both measuring methods have shown that eastern top (Skała Agaty) is higher than western one.

Jak wynika z tabeli 2 odchyłka zamknięcia poligonu niwelacyjnego wynosi 5 mm, co spełnia warunki dopuszczalnej odchyłki zamknięcia poligonu o długości $L = 1,605$ km dla niwelacji szczegółowej osnowy geodezyjnej [10]. Różnica wysokości wierzchołków obliczona na podstawie niwelacji geometrycznej jest o 2 cm większa niż określona na podstawie pomiarów metodą GNSS RTK, co zostało uwidocznione w tabeli 3.

Table 3. Elevation differences of main (G. Łysica) and eastern (G. Agata) tops of Łysica massif, measured with GNSS RTK and leveling methods

Tabela 3. Różnice wysokości wierzchołków masywu Łysicy, zachodniego (Góra Łysica) i wschodniego (Góra Agata), na podstawie pomiarów GNSS RTK (Δh_{RTK}) oraz niwelacji geometrycznej (Δh_{LEV})

Point	H [m]	Δh_{RTK} [m]	Δh_{LEV} [m]	$\Delta h_{RTK} - \Delta h_{LEV}$ [m]
1. G. Łysica (western top)	613.35	0.35	0.37	-0.02
2. G. Agata (eastern top)	613.70			

A satisfactory convergence of field measurements and DEM measurements has been found. A differences touches the limit values stated in the specification ISOK for ALS based DEM [8]. In case of Skała Agaty top, elevation measured on DEM is 0.3 m lower than measured using GNSS. It can be explained by the fact, that the forested narrow outcrop top hadn't been covered by ALS spot height probes sufficiently densely, because of vegetation cover – a density of point cloud for this region is about 4 points on sq. m, and only part of them are located on the ground.

4. Conclusions

The control surveys have shown a high accuracy of DEM obtained of ALS measurement for hilltop part of the Łysica massif. Moreover, the results of the measurements clearly show that the Skała Agaty top is the highest point of the Łysica massif and therefore also the Świętokrzyskie Mountains. The elevation difference is negligible, but by 1-2 orders of magnitude (depending on measurement method) larger than the accepted measurement errors. Geological structure of the ground allows to conclude that the elevation point is stable, however, the shape of the rock outcrop (Fig. 3) is not favorable for locating benchmark on it, excepting small rivets or nails. In contrast to him, the main top is a large peak platform favorable for measurement including the location of the triangulation tower. This is not a rare case – in the survey practice, spot heights are often located not at the very top (often rocky and inaccessible), but on the nearest convenient point below it. However, in this case, the tops are distant one to another for 700 meters, so they should be considered as separate ones. Noteworthy is that the higher elevation of Skała Agaty was observed in 1935 for the first time.

Both ALS and GNSS measurements shows that the Łysica massif tops are higher, than indicated on topographic maps. These findings prove the necessity of verification of elevation surveys of this area, including the control of geodetic elevation network, that should be continued using precise methods as i.e. static GNSS.

Obie metody pomiarowe wykazały że wierzchołek wschodni (Skała Agaty) jest wyższy. Można zatem stwierdzić zadowalającą zbieżność wyników pomiarów terenowych z pomiarami przeprowadzonymi na NMT, ponieważ rozbieżności nie przekraczają wartości granicznych zakładanych w specyfikacji ISOK [8].

4. Wnioski

Pomiary kontrolne wykazały wysoką dokładność NMT sporządzonego z pomiarów ALS dla wierzchołkowej części masywu Łysicy. Ponadto wyniki pomiarów jednoznacznie wskazują, że Skała Agaty jest najwyższym punktem masywu Łysicy, a zatem również Gór Świętokrzyskich. Różnica wysokości jest nieznaczna, lecz o 1-2 rzędy wielkości (w zależności od przyjętej metody) większa niż przyjmowane błędy pomiarowe. Budowa podłoża pozwala stwierdzić, że ten punkt wysokościowy jest stabilny, jednakże ukształtowanie wychodni skalnej nie sprzyja lokalizowaniu na nim punktów osnowy innych niż niewielkie nity lub gwoździe, co uwidoczniło na rysunku 3.

W przeciwieństwie do niego główny wierzchołek ma postać rozległej platformy szczytowej, która sprzyjała pomiarom, w tym lokalizacji wieży triangulacyjnej. Nie jest to przypadek odosobniony – w praktyce geodezyjnej często punkty pomiarowe lokalizuje się nie na samym wierzchołku (często skalistym i niedostępnym), lecz na najbliższym dogodnym punkcie poniżej niego. Jednakże w tym przypadku, ze względu na znaczne (700 m) oddalenie, szczyty powinny być traktowane jako osobne. Co również jest warte odnotowania, już pomiary z 1935 roku wykazały większą wysokość Skały Agaty, co z niewyjaśnionych dotąd przyczyn nie zostało uwzględnione na późniejszych mapach topograficznych. Istotne jest również, że najnowsze pomiary wykazują większą wysokość obu wierzchołków niż podawana na mapach topograficznych. Wynika stąd potrzeba dalszej weryfikacji pomiarów wysokościowych tego terenu, z uwzględnieniem kontroli wysokościowej osnowy geodezyjnej przy użyciu precyzyjnych metod pomiarowych takich jak statyczne pomiary GNSS.



Fig. 3. Spot height survey on the top of Skala Agaty rock – differential leveling

Rys. 3. Pomiar punktu wysokościowego na szczycie Skály Agaty – niwelacja geometryczna

References

- [1] Berezowski E.: *Polska sieć triangulacyjna z lat 1828-1829 na terenie Staropolskiego Okręgu Przemysłowego*, Kwartalnik „Historii Nauki i Techniki”, 29/3-4, 1984, s. 605-614.
- [2] Białokur M.: *Wzryś leśnej mapy gospodarczej*. Archiwum Świętokrzyskiego Parku Narodowego, nr inw. I/3/15c, 1935.
- [3] <http://digitool.is.cuni.cz>
- [4] <http://lazarus.elte.hu>
- [5] <http://mapy.geoportal.gov.pl>
- [6] <http://us.sokkia.com>
- [7] <http://www.mapywig.org>
- [8] Kurczyński Z.: *Mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego a dyrektywa powodziowa*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 23, 2012, s. 209-217.
- [9] Miernik P.: *Mapa geologiczna zakryta Pasma Łysogórskiego. Pierworys*. Archiwum Świętokrzyskiego Parku Narodowego, 1990.
- [10] Rozporządzenie Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 14 lutego 2012 r. w sprawie osnów geodezyjnych, grawimetrycznych i magnetycznych, Dz.U. 2012, poz. 352.
- [11] Zuchiewicz W., Badura J., Jarosiński M.: *Neotectonics of Poland: an overview of active faulting*. Studia Quaternaria, 24, 2007, pp. 5-20.

This study was performed within the scope of the statutory research project no. MNSP.IKGG.14.001, financed by Ministry of Science and Higher Education of Republic of Poland.

Badania zrealizowano w ramach pracy badawczej statutowej nr MNSP.IKGG.14.001, finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego Rzeczypospolitej Polskiej.

HUBERT TRĘBACZ

Warsaw University of Life Sciences

e-mail: h.trebacz@gmail.com

PIOTR MICHNO

Kielce University of Technology

e-mail: pmichno5@gmail.com

THE EVALUATION OF PLATINUM GROUP METALS (PGMS) AND THEIR RECOVERY FROM CAR CATALYTIC CONVERTERS

OCENA ZAWARTOŚCI PLATYNOWCÓW I METOD ICH ODZYSKU Z SAMOCHODOWYCH REAKTORÓW KATALITYCZNYCH

Abstract

Car catalysts significantly reduce air pollution - by reducing NO_x and oxidizing CO and HC. Every car put on the market must be equipped with a catalytic reactor in which the noble metals platinum, palladium and rhodium have a catalytic function. With the rapid development of the automotive industry and stringent emission regulations, the demand for platinum group metals is steadily increasing. PGM is used in many industries. The resources of these metals are constantly shrinking with increasing demand. Operation of catalysts causes the emission of PGMs to the environment. The recovery of platinum group metals from car catalysts has increased over the past decade, but is still insufficient. Processing 2 tons of used catalysts avoids the extraction of 150 tons of ore. At present, the world's used catalysts are processed by hydrometallurgical or pyrometallurgical way. Both methods allow for recovery of about 95% of platinum and palladium and 70% of rhodium. PGMs recovered from car catalysts is becoming an important source of these metals. There are ideas for platinum group metals mining in the solar system. It is significant that gases from catalytic reactors cause emissions to the environment of harmful platinum, which accumulates in street sediments, soil, plants, water and in animals.

The results of studies on monoliths derived from catalysts were carried out using a XRF Niton fluorescence spectrometer and electron microscope. In addition, the life cycle analysis of the catalytic reactor has been carried out from the moment of platinum extraction to operation and recycling.

Keywords: catalytic reactor, platinum group metal recovery, recycling of catalysts, electron microscope, XRF fluorescence spectrometer, LCA.

Streszczenie

Katalizatory samochodowe pozwalają w znaczny sposób ograniczyć zanieczyszczenie powietrza poprzez redukcję NO_x oraz utlenienie CO i HC. Każdy samochód wprowadzany na rynek musi być wyposażony w reaktor katalityczny, w którym metale szlachetne: platyna, pallad i rod pełnią funkcje katalityczne. Wraz z gwałtownym rozwojem motoryzacji i surowymi regulacjami dotyczącymi emisji spalin, stale wzrasta zapotrzebowanie na platynowce. PGM są wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu. Zasoby tych metali stale się kurczą przy zwiększającym się popycie. Eksploatacja katalizatorów powoduje emisję platynowców do środowiska. Odzysk platynowców z katalizatorów samochodowych w ciągu ostatnich dziesięciu lat wzrósł, ale wciąż jest niewystarczający. Przerób 2 Mg wyeksploatowanych katalizatorów pozwala uniknąć wydobywania 150 Mg rudy. Aktualnie na świecie zużyte katalizatory przerabia się na drodze hydrometalurgicznej lub pirometalurgicznej. Obie metody pozwalają na odzyskanie ok. 95% platyny i palladu oraz 70% rodu. Platynowce odzyskiwane z katalizatorów samochodowych stają się więc istotnym źródłem tych metali. Pojawiają się pomysły wydobywania platynowców w Układzie Słonecznym. Należy pamiętać, że gazy z reaktorów katalitycznych powodują emisję do środowiska szkodliwej platyny, która kumuluje się w osadach ulicznych, glebie, roślinach, wodzie oraz w zwierzętach. W publikacji przedstawiono wyniki badań monolitów pochodzących z katalizatorów przeprowadzone spektrometrem

fluorescencyjnym XRF Niton oraz mikroskopem elektronowym. Ponadto przeprowadzono analizę cyklu życia reaktora katalitycznego od momentu wydobywania platynowców po eksploatację i recykling.

Słowa kluczowe: reaktor katalityczny, odzysk platynowców, recykling katalizatorów, mikroskop elektronowy, spektrometr fluoroscencyjny XRF, LCA.

1. Introduction

Since 1975 in the USA, 1989 in Germany and 1993 in the countries of the European Union used to reduce emissions of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x) and hydrocarbons (C_mH_n) through the use of catalytic converters in the exhaust system. French mechanical engineer Eugene Houdry, who helped Johnny J. Mooney and Carl D. Keith in the production of the first catalytic reactor in 1973, was recognized as the precursor of the study of the first catalysts. [1, 2]

The use of catalytic converters in cars has resulted in a reduction of about 90% Carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides. New sources of environmental pollution are emerging that pose a threat to humanity that has not yet been fully acknowledged. One such source may be the recent presence in the PGMs environment that comes from car catalytic converters. Catalysts are exposed to high temperatures, rapid changes in oxidation-reduction conditions, mechanical abrasion and corrosion. This results in the cracking and crushing of the monolith, followed by the penetration of the active layer containing the PGMs coating along with the exhaust gases into the environment. Platinum group metals has been identified in road sediments, plants, including edible, animal products, and in water and sewage sludge. The rise in market prices for PGMs has led to interest not only in their recovery from catalysts but also in the illegal disposal of catalysts for commercial purposes. [1, 3-4]

The world is struggling with the problem of depletion of some raw materials. As such list, it will soon be possible to include PGMs, which is an important source for many products, with the upward trend in demand. Platinum group metals have a wide application in many industries ranging from electronics and electrical appliances to medicine and environmental protection, so it can easily get the material for recovery. It would be environmentally and economically feasible to create a complex technology for the recovery of valuable elements. Another argument is the fact that the dependence on supplies from countries on the raw materials market is monopoly.

1. Wprowadzenie

Od 1975 roku w USA, 1989 w Niemczech i 1993 w krajach Unii Europejskiej wprowadzono ograniczenie emisji tlenku węgla (CO), tlenków azotu (NO_x) i węglowodorów (C_mH_n) poprzez zastosowanie reaktorów katalitycznych w układzie wydechowym samochodów. Za prekursora badań pierwszych katalizatorów uznano francuskiego inżyniera mechanika Eugene Houdry, którego badania pomogły Johny'emu J. Mooney i Carlowi D. Keith w produkcji pierwszego reaktora katalitycznego w 1973 roku [1, 2].

Stosowanie w samochodach katalizatorów wpłynęło na redukcję ok. 90% zanieczyszczeń m.in. tlenków węgla, węglowodorów oraz tlenków azotu. Odkrywane są nowe źródła zanieczyszczenia środowiska stanowiące zagrożenie dla ludzkości, które nie zostało jeszcze jednak w pełni potwierdzone. Jednym z takich źródeł może być odnotowana w ostatnim czasie obecność w środowisku platynowców, które pochodzą z samochodowych reaktorów katalitycznych. Katalizator narażony jest na działanie wysokiej temperatury, szybkie zmiany warunków utleniająco-redukujących, mechaniczne ścieranie oraz korozję. Skutkuje to pękaniem i kruszeniem monolitu, a następnie przedostaniem się cząstek warstwy aktywnej zawierającej platynowce wraz ze spalinami do środowiska. Platynowce zidentyfikowano w osadach drogowych, roślinach, w tym również jadalnych, produktach pochodzenia zwierzęcego oraz w wodzie i osadach ściekowych. Wzrost ich cen spowodował zainteresowanie nie tylko ich odzyskiem z katalizatorów, ale zwiększył się również nielegalny demontaż katalizatorów w celach komercyjnych [1, 3-4].

Świat boryka się z problemem wyczerpywania niektórych surowców. Na taką listę już wkrótce można będzie wpisać platynowce, które stanowią ważne źródło dla wielu produktów, przy tendencjach wzrostowych popytu, mają one szerokie zastosowanie w wielu gałęziach gospodarki, od elektroniki i elektryki po medycynę czy ochronę środowiska, dzięki czemu można łatwo pozyskać materiał do odzysku. Korzystnym dla środowiska i ekonomicznie uzasadnione byłoby stworzenie kompleksowej technologii odzysku cennych pierwiastków. Kolejnym argumentem jest fakt uniezależnienia się od dostaw z krajów, które na rynku surowców są monopolistami.

2. Methods of PGMs recovery

We have two main methods for recovering platinum from car catalytic converters: hydrometallurgical and pyrometallurgical. Both methods are highly effective, recovering about 95% of palladium and platinum and up to 70% of rhodes [5, 6]. These are data that do not account for losses during operation. The basic stage for platinum recovery is the proper preparation of the material. First, the monolith must be extracted from the metal body. Then the catalytic block is homogenized because platinum is dispersed. The next step is to choose the right recovery method. The conditions for access to waste from various industries should be the decisive factor in selecting the method.

The hydrometallurgical method consists in the passage of chloride complexes (MCl_6^{2-}) by dissolving in aqueous solutions of nitrates, bromates, chlorates, chlorides, chlorine, royal water and hydrogen peroxide. The effect of this reaction is to obtain a solution with a low PGMs content. Therefore, it is necessary to enrich the sample to increase their concentration. Hydrometallurgical methods include the following methods of platinum recovery: cyanide extraction, separation, extraction with royal water and chlorination. The side effect of this method is the formation of large quantities of concentrated waste solutions that pose a threat to the environment [5, 6].

The second method of platinum recovery is the pyrometallurgical method. It involves roasting up to 2000 °C a homogenised monolith sample with the addition of another metal, eg iron, which acts as a binding agent. Then the PGMs passes to the melt, and the carriers are separated and scrapped. Thanks to this, we get a PGM-rich metal that is subjected to a refining process. The combination of hydrometallurgical and pyrometallurgical methods contributes to the efficiency of platinum metals recovery [6].

The largest corporations involved in the processing of used car catalysts and PGMs recovery include: Degussa AG (Italy), Engelhard Corp. (Italy), W.C. Heraeus (Germany), Matthey Products LTD (UK), Gemini Industries (USA), Societe Generale des Minerais (France) and Tanaka Kikinokogyo K.K. (Japan) [5].

2. Metody odzysku platynowców

Mamy do dyspozycji dwie główne metody odzysku platynowców z samochodowych reaktorów katalitycznych: hydrometalurgiczna i pirometalurgiczna. Oba sposoby są wysoce efektywne, pozwalają odzyskać około 95% palladu i platyny oraz do 70% rodu [5, 6]. Są to dane nieuwzględniające strat podczas eksploatacji. Podstawowym etapem przy odzysku platynowców jest odpowiednie przygotowanie materiału. Należy najpierw wydobyć monolit z metalowego korpusu. Następnie blok katalityczny poddajemy homogenizacji, ponieważ platynowce są rozproszone. Kolejnym etapem jest wybór odpowiedniej metody odzysku. Czynniki rozstrzygającymi o doborze metody powinny być warunki dostępu do odpadów z różnych gałęzi przemysłu.

Metoda hydrometalurgiczna polega na przechodzeniu kompleksów chlorkowych (MCl_6^{2-}) w wyniku rozpuszczenia w roztworach wodnych azotanów, bromianów, chloranów, chlorków, chloru, wody królewskiej i wody utlenionej. Efektem tej reakcji jest otrzymanie roztworu o niewielkiej zawartości platynowców. Dlatego niezbędne jest wzbogacenie próbki, aby zwiększyć ich stężenie. Do metod hydrometalurgicznych należą następujące sposoby odzysku platynowców: ekstrakcja cyjankami, rozdzielanie, ekstrakcja wodą królewską oraz chlorowanie. Skutkiem ubocznym tej metody jest powstawanie dużej ilości stężonych roztworów odpadowych, stanowiących zagrożenie dla środowiska [5, 6].

Drugim ze sposobów odzysku platynowców jest metoda pirometalurgiczna. Polega ona na prażeniu w temperaturze do 2000°C zhomogenizowanej próbki monolitu wraz z dodatkiem innego metalu, np. żelaza, który pełni funkcję wiążącą. Następnie platynowce przechodzą do stopu, a nośniki są oddzielane i złomowane. Dzięki temu otrzymujemy metal bogaty w platynowce, który poddać należy procesowi rafinacji. Połączenie metod hydrometalurgicznej i pirometalurgicznej przyczynia się do zwiększenia efektywności odzysku platynowców [6].

Do największych koncernów zajmujących się przetwarzaniem wyeksploatowanych samochodowych katalizatorów i odzyskiem platynowców należą m.in.: Degussa AG (Włochy), Engelhard Corp. (Włochy), W.C. Heraeus (Niemcy), Matthey Products LTD (Wielka Brytania), Gemini Industries (USA), Societe Generale des Minerais (Francja) oraz Tanaka Kikinokogyo K.K. (Japonia) [5].

3. Evaluation of PGMs content by electron microscope

The study was based on three different samples of ceramic monoliths derived from automotive catalytic converters. The study was carried out by scanning electron microscope type (SEM-EDS) model 1430 VP in March 2012 at the Instrumental Analysis Laboratory at Nicolaus Copernicus University in Toruń. Analyses were made on the following materials:

- sample No. 1 comes from a Citroen Xsara car with a mileage of 120000 km with a spark engine (Petrol);
- sample No. 2 comes from a Volkswagen T4 car with a mileage 520000 km with a self-propelled engine (Diesel);
- sample No. 3 comes from a Volkswagen T4 car with a mileage 420000 km with a self-propelled engine (Diesel).

3. Ocena zawartości platynowców mikroskopem elektronowym

Badanie przeprowadzono na podstawie trzech różnych próbek ceramicznych monolitów pochodzących z samochodowych reaktorów katalitycznych. Badanie przeprowadzono skaningowym mikroskopem elektronowym typu (SEM-EDS), model 1430 VP w marcu 2012 roku w Pracowni Analiz Instrumentalnych Wydziału Chemii na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Dokonano analizy na następujących materiałach:

- próbka nr 1 pochodzi z samochodu marki Citroen Xsara o przebiegu 120000 km z silnikiem iskrowym (benzyna),
- próbka nr 2 pochodzi z samochodu marki Volkswagen T4 o przebiegu 520000 km z silnikiem samoczynnym (Diesel),
- próbka nr 3 pochodzi z samochodu marki Volkswagen T4 o przebiegu 420000 km z silnikiem samoczynnym (Diesel).

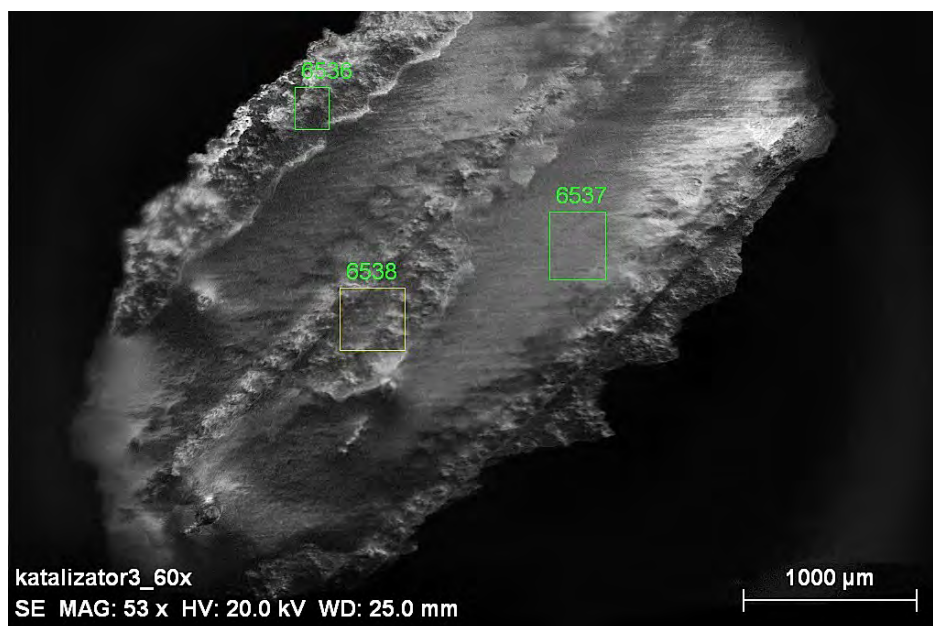


Fig. 1. Electron microscope picture showing a ceramic monolith tubule for sample No.2 [7]

Rys. 1. Zdjęcie z mikroskopu elektronowego przedstawiające kanalik ceramicznego monolitu dla próbki nr 2 [7]

Figure 1 shows a microscope photo of one ceramic tubing from sample No. 2. The three points indicated in the photo indicate the location where the microscope was analyzed for PGMs content. An example of such graphical analysis is depicted above (Figure 2). The graphs can see peaks that indicate what elements are in the sample. The microscope detected the expected PGMs, in this case platinum.

Na rysunku 1 przedstawiono zdjęcie z mikroskopu jednego kanalika ceramicznego pochodzącego z próbki nr 2. Trzy zaznaczone na zdjęciu punkty wskazują lokalizację, w którym miejscu wykonano analizę mikroskopem na zawartość platynowców. Przykład takiej analizy graficznej zobrazowano na rysunku 2. Na wykresie zaobserwować można piki, które wskazują jakie pierwiastki znajdują się w danej próbce. Mikroskop wykrył oczekiwane platynowce, w tym przypadku platynę.

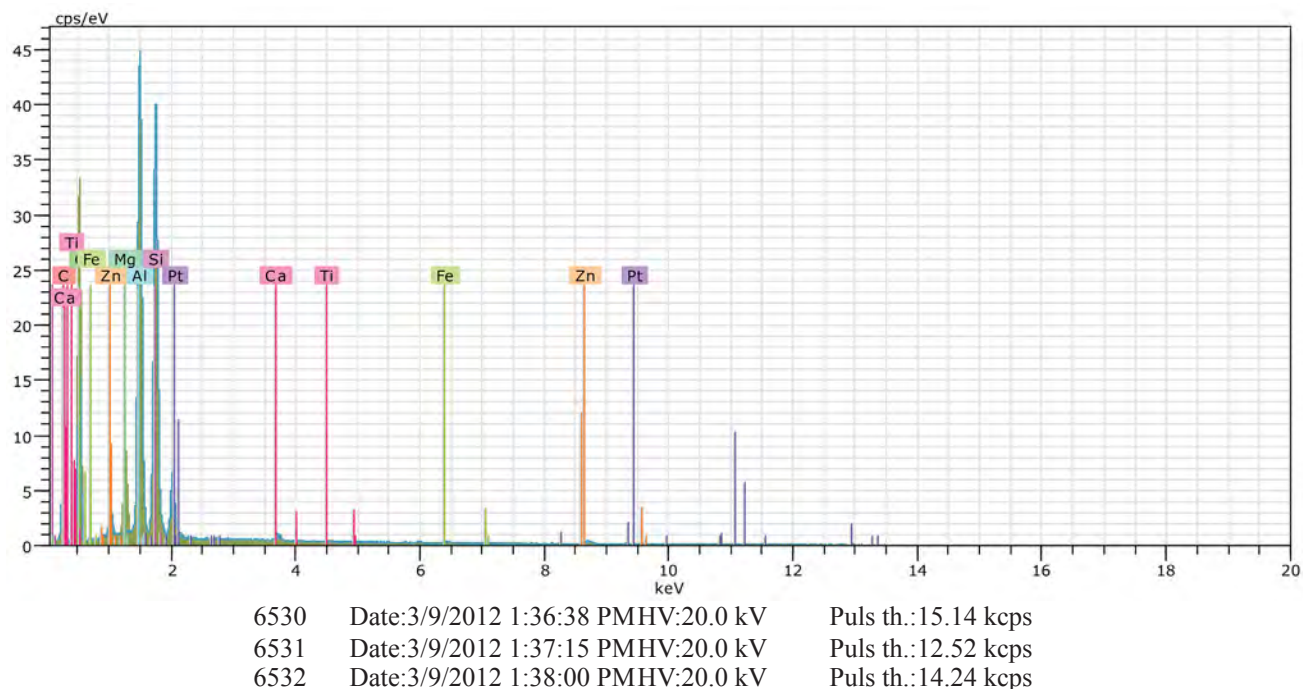


Fig. 2. Electron microscope measurement result for sample No. 1 [7]

Rys. 2. Wynik pomiaru mikroskopem elektronowym dla próbki nr 1 [7]

Table 1. Electron microscope measurements for sample No.1 [7]

Tabela 1. Wyniki pomiarów wykonane mikroskopem elektronowym dla próbki nr 1 [7]

Spectrum	Participation (%)									
	O	C	Al	Si	Pt	Mg	Zn	Fe	Ca	Ti
6530	51.26	29.66	16.36	13.74	3.37	0.32	1.83	0.33	0.40	0.11
6531	63.08	6.86	20.19	13.00	5.36	4.90	0.62	0.73	0.06	0.24
6532	48.34	32.61	16.56	13.07	3.54	0.36	1.86	0.45	0.31	0.09
Average value:	54.23	23.04	17.70	13.27	4.09	1.86	1.44	0.50	0.26	0.15
Sigma:	7.80	14.09	2.16	0.41	1.10	2.63	0.70	0.20	0.18	0.08
Sigma mean:	4.51	8.14	1.24	0.23	0.64	1.52	0.41	0.12	0.10	0.05

It should be noted that the samples were prepared for analysis in the form of small cubes, without undergoing homogenization. The results of the electron microscope are surprising for all three samples compared to the XRF study described later in this article.

In Table 1, the highest percentage is oxygen, which is understandable because the monolith is porous and is necessary for oxidation processes. Optimal oxygen values are regulated by an oxygen sensor that is positioned before and after the catalytic reactor. Coal, on the other hand, is the result of fuel combustion as well as the constituent of petroleum substances. The percentage of carbon in sample

Należy dodać, że próbki były przygotowane do analizy w formie małych sześcianów, bez poddania ich homogenizacji. Wyniki wykonane mikroskopem elektronowym są zaskakujące dla wszystkich trzech próbek w porównaniu do badania XRF-em przedstawione w dalszej części artykułu.

W tabeli 1 największy udział procentowy stanowi tlen, co jest zrozumiałe ze względu na fakt, że monolit jest porowaty i do procesów utleniania jest on niezbędny. Optymalne wartości tlenu są regulowane przez sondę lambda, która umieszczona jest przed i za reaktorem katalitycznym. Węgiel natomiast jest efektem spalania paliwa, jak i składnikiem substancji ropopochodnych. Udział procentowy węgla w próbce nr

1 is significantly higher than in two consecutive samples. Clay, silicon and magnesium are the main components of the ceramic monolith. The role of zinc, iron and calcium in monolith is not known. They may be an additive to the core of a catalyst whose composition is covered by trade secrets. It is unknown why the electron microscope identified the presence of zinc only in sample No. 1. The XRF fluorescence spectrometer showed the zinc content of all three samples tested. The role of titanium is probably to strengthen the ceramic composite. Surprisingly, there is no palladium and rhodium in the test material that is visible in the XRF. This can be explained by the fact that the sample was not representative, since the ceramic monolith has tubules and may contain the remaining PGMs. Therefore, they may be inaccessible to the electron microscope because they were not on the surface of the sample being analyzed.

1 jest zdecydowanie wyższy niż w dwóch kolejnych próbkach. Glin, krzem oraz magnez stanowią główne składniki ceramicznego monolitu. Rola cynku, żelaza oraz wapnia w monolicie nie jest znana. Mogą one stanowić dodatek do rdzenia katalizatora, którego skład jest objęty tajemnicą handlową. Niewiadomą jest, dlaczego mikroskop elektronowy stwierdził obecność cynku wyłącznie w próbce nr 1. Natomiast spektrometr fluoroscencyjny XRF wykazał zawartość cynku we wszystkich trzech badanych próbkach. Rolą tytanu jest zapewne wzmocnienie kompozytu ceramicznego. Zaskoczeniem jest brak w badanym materiale palladu i rodu, który jest widoczny w badaniu XRF. Można to wytłumaczyć tym, że próbka nie była reprezentatywna, ponieważ monolit ceramiczny posiada kanaliki i może w nich są pozostałe platynowce, dlatego mogą być niedostępne dla mikroskopu elektronowego, gdyż nie było ich na powierzchni analizowanej próbki.

Table 2. Electron microscope measurements for sample No. 2 [7]

Tabela 2. Wyniki pomiarów wykonane mikroskopem elektronowym dla próbki nr 2 [7]

Spectrum	Participation (%)										
	O	Al	Pt	V	Ca	C	Si	Ti	Fe	Mg	Na
6533	54.92	11.89	9.49	7.26	4.38	2.13	0.81	1.56	0.92	0.39	0.77
6534	54.92	12.36	9.28	7.16	5.04	2.46	0.92	1.36	1.02	0.47	0.90
6535	56.59	14.85	9.67	6.49	2.15	2.09	3.29	0.64	0.88	1.78	0.38
Average value:	55.48	13.03	9.48	6.97	3.86	2.23	1.67	1.18	0.94	0.88	0.68
Sigma:	0.96	1.59	0.19	0.42	1.51	0.20	1.40	0.48	0.07	0.78	0.27
Sigma mean:	0.56	0.92	0.11	0.24	0.87	0.12	0.81	0.28	0.04	0.45	0.16

The results of sample No. 2 shown in Table 2 are similar to the values in Table 1. The material analyzed had the highest platinum content of all samples tested by electron microscope. Elements such as calcium, titanium and iron are also found together only in sample No.1. Vanadium can also be found in sample No.3. Because the element acts as a catalyst in the form of vanadium oxide (V_2O_5), it is located on carriers and its task together with Fe_2O_3 is oxidized SO_2 to SO_3 [8]. Its presence in samples No. 2 and No.3 should not be a surprise, because car exhaust gas desulphurization takes place only in diesel engines. The oxygen values are similar in all three samples. As in the above, palladium and rhodium are absent, and platinum takes the highest value from the three samples – 9.48% (the remaining 4.09% and 9.24% respectively).

Wyniki próbki nr 2 zestawione w tabeli 2 są zbliżone do wartości w tabeli 1. Analizowany materiał posiadał największą ilość platyny spośród wszystkich badanych próbek przez mikroskop elektronowy. Pierwiastki takie jak wapń, tytan oraz żelazo znajdują się wspólnie również tylko w próbce nr 1. Natomiast wanad odnaleźć możemy także w próbce nr 3. Ponieważ pierwiastek ten funkcjonuje jako katalizator w formie tlenku wanadu (V_2O_5), zlokalizowany jest na nośnikach i jego zadaniem wraz z Fe_2O_3 jest utlenienia SO_2 do SO_3 [8]. Nie powinna dziwić jego obecność w próbkach nr 2 oraz 3, ponieważ odsiarczanie samochodowych spalin odbywa się tylko w silnikach wysokoprężnych. Wartości tlenu są zbliżone we wszystkich trzech próbkach. Brak jest również palladu i rodu, a platyna przyjmuje spośród trzech próbek najwyższą wartość – 9,48% (pozostałe kolejno 4,09% oraz 9,24%).

Table 3. Electron microscope measurements for sample No. 3 [7]

Tabela 3. Wyniki pomiarów wykonane mikroskopem elektronowym dla próbki nr 3 [7]

Spectrum	Participation (%)									
	O	Al	Pt	Ba	Si	C	V	Mg	Ni	S
6536	53.16	14.23	6.69	5.81	8.81	3.43	1.86	4.72	0.90	0.38
6537	55.65	10.03	10.14	12.58	0.00	3.91	4.73	0.02	2.03	0.88
6538	50.52	12.87	10.88	7.21	6.99	3.57	2.53	3.81	1.33	0.31
Average value:	53.11	12.38	9.24	8.53	5.27	3.64	3.04	2.85	1.42	0.53
Sigma:	2.57	2.14	2.24	3.58	4.65	0.25	1.50	2.49	0.57	0.31
Sigma mean:	1.48	1.24	1.29	2.07	2.68	0.14	0.87	1.44	0.33	0.18

The greatest unknown is the result of sample No. 3, as shown in Table 3. There are three elements that the electron microscope failed to show in the other two samples. It is a bar, nickel and sulfur. The presence of sulfur can be explained by the fact that it is contained in the fuel, and that the catalyst also contains a desulphurisation process. Nickel is used to stop corrosion of steel - a small part of it could have come from the catalyst housing. According to one of the publications [9], the bar can be found in large quantities in sewage from the ceramic industry. It may have contaminated the material under investigation or is also a trade secret as a component of the monolith.

4. Evaluation of PGMs content by XRF fluorescence spectrometer

At the beginning of the interpretation of the results, the analyzed samples of automotive catalytic converters should be separated into:

- derived from internal combustion engines (sample No.1);
- derived from compression-ignition engines (samples No. 2 and No. 3).

It should be added that the analyzed monolithic material was crushed with mortar and then homogenised. This was to achieve homogeneous and averaged samples referring to the entire monolith. The study was conducted manual fluorescence spectrometer XRF Niton XL3t model in January 2012. In one of the private stocks of automotive catalysts in Warsaw.

Sample No.1 came from a used car, with petrol as a fuel source. As a reminder, the catalytic converter was removed from the Citroen Xsara with a mileage of 120000 km. After analyzing the platinum content, there is a strong advantage of platinum compared

Największą niewiadomą stanowi wynik przeprowadzony na próbce nr 3 zestawiony w tabeli 3. Występują trzy pierwiastki, których mikroskop elektronowy nie wykazał w dwóch pozostałych próbkach. Jest to bar, nikiel oraz siarka. Obecność siarki można wytłumaczyć tym, że jest ona zawarta w paliwie, a w katalizatorze zachodzi również proces odsiarczania. Nikiel wykorzystywany jest, aby powstrzymać korozję stali – niewielka jego część mogła przedostać się z obudowy katalizatora. Jak podaje jedna z publikacji [9], bar można odnaleźć w dużej ilości w ściekach pochodzących z przemysłu ceramicznego. Mogło dojść do zanieczyszczenia analizowanego materiału w czasie produkcji lub stanowi on również tajemnicę handlową jako składnik monolitu.

4. Ocena zawartości platynowców przy pomocy spektrometru fluorescencyjnego XRF

Na początku interpretacji wyników należy dokonać rozdziału analizowanych próbek samochodowych reaktorów katalitycznych na:

- pochodzące z silników spalinowych (próbka nr 1),
- pochodzące z silników wysokoprężnych (próbki nr 2 i 3).

Dodać należy, że analizowane materiały pochodzące z monolitu zostały zgniecione moździerzem, a następnie zhomogenizowane. Miało to na celu uzyskanie jednorodnych i uśrednionych próbek odnoszących się do całego monolitu. Badanie zostało przeprowadzone ręcznym spektrometrem fluorescencyjnym XRF Niton model XL3t w styczniu 2012 roku na terenie jednego z prywatnych skupów katalizatorów samochodowych w Warszawie.

Próbka nr 1 pochodziła z samochodu wykorzystującego jako źródło paliwa benzynę. Dla przypomnienia katalizator został wymontowany z pojazdu Citroen Xsara o przebiegu 120000 km. Po analizie zawarto-

Table 4. Measurements made by XRF manual fluorescence spectrometer for three samples [7]

Tabela 4. Wyniki pomiarów wykonane ręcznym spektrometrem fluorescencyjnym XRF dla trzech próbek [7]

Measure No. 1	[ppm]	[%]	Measure No. 2	[ppm]	[%]	Measure No. 3	[ppm]	[%]
Ceramics (Bal)	974000	98.54	Ceramics (Bal)	908000	96.83	Ceramics (Bal)	702000	91.09
Iron (Fe)	7877	0.80	Zirconium (Zr)	16500	1.76	Zirconium (Zr)	58000	7.53
Platinum (Pt)	3714	0.38	Iron (Fe)	7123	0.76	Silver (Ag)	2900	0.38
Zinc (Zn)	1125	0.11	Zinc (Zn)	4040	0.43	Zinc (Zn)	2293	0.30
Zirconium (Zr)	1116	0.11	Palladium (Pd)	1291	0.14	Cadmium (Cd)	2001	0.26
Palladium (Pd)	224	0.02	Copper (Cu)	449	0.05	Palladium (Pd)	1730	0.22
Rod (Rd)	217	0.02	Rod (Rd)	276	0.03	Rod (Rd)	892	0.12
Molybdenum (Mo)	67	0.01	Strontium (Sr)	53	0.01	Platinum (Pt)	606	0.08
Strontium (Sr)	42	0.00	Niobium (Nb)	Strontium (Sr)	0.00	Stront (Sr)	161	0.02
Niobium (Nb)	27	0.00				Niobium (Nb)	84	0.01
	988409	100		937764	100		770667	100

to other PMGs – palladium and rhodium. At first glance, this proves that it is a ceramic monolith (very high 98.5% Bal). Surprising is the measurement in the analyzed molybdenum sample – in the other two samples XRF did not detect it. It is presumed that it may be one of the components of the platinum monolith (its admixtures are part of the commercial secret of the manufacturers of the catalyst core), or the result of incomplete combustion of car oil, the friction reducing additive is molybdenum dithiocarbamate. [10] In addition, this compound reduces fuel consumption, which, at present high costs at gas stations, is an extremely valuable source of savings.

Samples No. 2 and No. 3 come from diesel cars. As a reminder, they were Volkswagen T4 cars with 520000 km and 420000 km mileage. After Table 4 analysis, it can be seen that these are palladium monoliths with a mixture of platinum and palladium. Both of these monoliths came from the same vehicle model, so there is no way to differentiate the catalyst composition. However, platinum was not detected in sample No. 2. This is probably the result of an error, because the sample may have been unrepresentative or the monolith powder was mixed poorly. You can also consider platinum emissions because sample No. 2 came from the car that had the largest number of kilometers and the most ruined monolith - the crushed ceramic block. The element that is found in two of the three samples is iron. It may come from a cut-off of a metal portion of a catalytic reactor shell to extract a monolith. Metal filings could hit inside and contaminate the monolith, pointing to the iron. Strontium, which we find in all the samples, is a

ści platynowców zauważa się zdecydowaną przewagę platyny w stosunku do pozostałych platynowców – palladu i rodu. Świadczy to o tym, że jest to monolit ceramiczny (bardzo duża zawartość Bal – 98,5%). Zaskakujący jest pomiar w analizowanej próbce molibdenu – w pozostałych dwóch próbkach XRF go nie wykrył. Przypuszcza się, że może on być jednym ze składników platynowego monolitu (jego domieszki są elementem tajemnicy handlowej producentów rdzenia katalizatora) bądź efektem niepełnego spalania oleju samochodowego, którego dodatkiem redukującym tarcie jest ditiokarbaminian molibdenu [10]. Dodatkowo związek ten powoduje redukcję zużycia paliwa.

Próbki numer 2 i 3 pochodzą z samochodów z silnikami wysokoprężnymi. Dla przypomnienia były to odpowiednio samochody Volkswagen T4 o przebiegach 520000 km oraz 420000 km. Po analizie tabeli 4 zaobserwować można, że są to monolity palladowe z domieszką platyny i palladu. Oba monolity pochodziły z tego samego modelu pojazdu, dlatego nie ma możliwości, aby różniły się składem katalizatorów. Jednak platyny nie wykryto w próbce nr 2. Prawdopodobnie jest to wynik błędu, ponieważ próbka mogła być nie-reprezentatywna bądź został źle wymieszany proszek monolitu. Można też się zastanowić nad emisją do środowiska platyny, ponieważ próbka nr 2 pochodziła z samochodu, który miał przejechaną największą liczbę kilometrów i najbardziej zniszczony monolit – pokruszony blok ceramiczny. Pierwiastkiem, który znajduje się w dwóch z trzech próbek jest żelazo. Może ono pochodzić z wycięcia fragmentu metalowej obudowy reaktora katalizacyjnego w celu wydobycia monolitu. Opiłki metalu mogły trafić do środka i zanieczyścić monolit, wskazując właśnie żelazo. Natomiast stront,

constituent of two minerals: strocannite (SrCO_3) and celestine (SrSO_4). Probably one of these geological products is a core component, whose composition is covered by trade secrets of ceramic monolith manufacturers. In one publication [11] it can be seen that strontium resources in the form of celestine having an orthorhombic system are used in the ceramic industry. Other elements include Source of the intermediate layer, eg zirconium or niobium, as a component of heat-resistant components. Additionally, based on the information contained in [12], the following oxides are present in the monolith as dopants for the oxidation of flue gases: Ag_2O , Fe_2O_3 , CuO , V_2O_5 , Cr_2O_3 , TiO_2 , MnO_2 . Unfortunately there is no precise information about the mechanism and limit values of these oxides in the overall balance of the catalyst core.

The measurement showed the highest amount of ceramics from all three monoliths in sample No. 1, representing Bal as 98.5%, 96.8%, and 91.1%, respectively. Sample No.1 has the highest amount of precious metals among the analyzed catalytic reactors. This is certainly related to the source of fuel in the form of gasoline, because the diesel catalysts have a different composition of the fuel mixture and also emit other gases such as sulfur dioxide or a large amount of soot. In addition, sample 3 contains harmful cadmium. There is no information on cadmium in catalysts available from my literature. However, from interviews with the owner of the Warsaw purchase of catalytic reactors, I have been informed that some old catalytic reactors have carcinogenic asbestos. Asbestos was commonly used as an insulating material, a material for refractory fabrics, pipes and roofing.

5. LCA as a tool in environmental protection

The Life Cycle Assessment (LCA), which is a life cycle assessment, consists in assessing the full life of a product from its production and processing to production, operation and disposal. This cycle is commonly referred to as "cradle to grave" or "from birth to death". The well-executed life cycle assessment should consist of the following components: raw material acquisition \rightarrow material production \rightarrow production \rightarrow transport \rightarrow exploitation \rightarrow elimination. In the LCA analysis, we can perform product impact studies on greenhouse gases, ozone depletion, acidification, eutrophication, smog, pesticides, industrial heavy metals, heavy metals in water, carcinogens, ecotoxicity (terrestrial, freshwater

który odnajdujemy we wszystkich próbkach – jest on składnikiem dwóch minerałów: strocjanitu (SrCO_3) oraz celestynu (SrSO_4). Prawdopodobnie któryś z tych geologicznych wytworów jest komponentem rdzenia, którego skład owiany jest tajemnicą handlową producentów. W jednej z publikacji [11] znaleźć można informację, że surowce strontowe, w postaci celestynów posiadających układ rombowy, wykorzystywane są w przemyśle ceramicznym. Pozostałe pierwiastki są m.in. źródłem warstwy pośredniej, np. cyrkon lub niob, jako składnik żaroodpornych elementów. Dodatkowo na podstawie informacji zawartych w [12] wynika, że następujące tlenki znajdują się w monolicie jako domieszki, których celem jest utlenienie spalin: Ag_2O , Fe_2O_3 , CuO , V_2O_5 , Cr_2O_3 , TiO_2 , MnO_2 . Niestety brak jest dokładnych informacji dotyczących mechanizmu oraz wartości granicznych tych tlenków w ogólnym bilansie rdzenia katalizatora.

Pomiar wykazał największą ilość ceramiki spośród wszystkich trzech analiz monolitów w próbce nr 1, przedstawiając jako Bal – jest to odpowiednio 98,5%, 96,8% oraz 91,1%. Próbka nr 1 ma największą ilość metali szlachetnych spośród analizowanych reaktorów katalitycznych. Ma to związek ze źródłem paliwa w postaci benzyny, ponieważ katalizatory do Diesla mają inny skład mieszanki paliwowej i emitują inne spaliny, np. dwutlenek siarki czy duża ilość pyłów (sadzy). Dodatkowo w próbce nr 3 znajduje się szkodliwy kadm. Z dostępnej przeze mnie literaturze brak jest informacji na temat kadmu w katalizatorach. Jednak z przeprowadzanych rozmów z właścicielem warszawskiego skupu reaktorów katalitycznych wynika, że w niektórych starych modelach reaktorów katalitycznych znajduje się kancerogeny azbest, który wykorzystywany był popularnie m.in. jako materiał izolacyjny.

5. LCA jako narzędzie w ochronie środowiska

LCA z ang. Life Cycle Assessment, czyli ocena cyklu życia, polega na ocenie pełnego okresu życia wyrobu od momentu jego wydobycia i przetworzenia surowców po produkcję, eksploatację i jego likwidację. Cykl ten zwany jest potocznie jako ocena „od kołyski do grobu” lub „od narodzin do śmierci”. Dobrze wykonana ocena cyklu życia powinna składać się z następujących elementów: pozyskiwanie surowców \rightarrow wytwarzanie materiałów \rightarrow produkcja \rightarrow transport \rightarrow użytkowanie \rightarrow likwidacja. W analizie LCA możemy wykonać badania oddziaływania produkcji wyrobów na poszczególne elementy: efekt cieplarniany, zubożenie warstwy ozonowej, zakwaszenie, eutrofizacja, smog, pestycydy, metale ciężkie w przemyśle,

and saltwater) Reduction of mineral resources. [13, 14-15].

Life cycle assessment can be helpful in [14]:

- opportunities for identifying improvement of environmental components in different phases of product manufacturing;
- is one of the options available to decision-makers, eg in planning or prioritizing;
- marketing - help in eco-labeling or environmental statements of products;

LCA analysis was performed using the SimaPro software version 7.3.2. PhD for a single car catalytic converter. Some of the data comes from the CLM Baseline library, others I personally acquired (among others from platinum mining companies in South Africa or companies that produce ceramic monoliths).

Below are the results of the simulation in the form of column charts. Simulation involves the following effects: abiotic depletion in [kg Sb eq], acidification in [SO₂ eq], eutrophication [kg PO₄ eq], global warming (GWP 100) [kg CO₂ eq], ozone layer depletion (ODP) [kg CFC eq], human toxicity [kg 1.4 – DB eq], fresh water aquatic ecotoxicity [kg 1.4 – DB eq], marine aquatic ecotoxicity [kg 1.4 – DB eq], terrestrialecotoxicity [kg 1.4 – DB eq] and photochemical oxidation [kg C₂H₄ eq]. Charts have to be presented in a logarithmic scale because of the huge differences between the various indicators.

LCA simulations for the car catalytic converter have been divided into 4 modules. The first one is the extraction and production of PMGs. It assumes that the input data will be the following processes: platinum extraction, concentration, refining and smelting. Information on the amount of anthropogenic products produced was available: electricity and water consumption, amount of waste water and gases produced (CO₂). Another module that was specified for analysis purposes is steel and monolith production. Steel is used on the reactor housing, while ceramic monolith is the "heart" of the catalyst on which the PGMS are placed. The obtained data allowed to influence the production process for ceramic monolith in a company located in Poland. Out of the data it is. Consumption of gas, electricity, water, argon emissions, CO₂, Solids and dusts, ceramic waste and sewage production with the limitations of the SimaPro program could only be used for gas consumption, electricity, CO₂ emissions And waste water production. This is due to the lack of many production processes in LCA libraries,

metale ciężkie w wodzie, substancje rakotwórcze, ekotoksyczność (lądowa, dla wód słodkich i słonych), zmniejszenie surowców mineralnych [13-15].

Ocena cyklu życia może być pomocna w [14]:

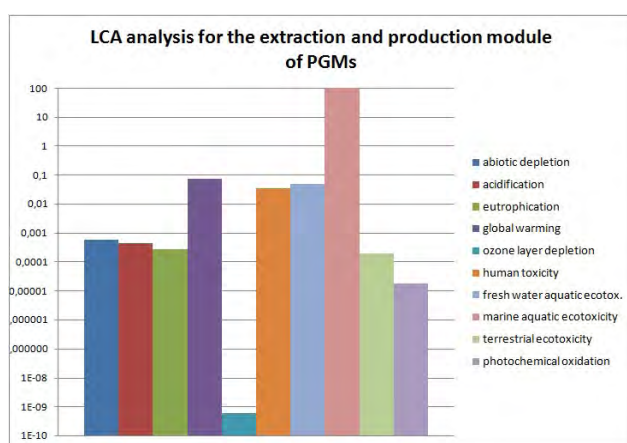
- możliwości identyfikacji poprawy komponentów środowiska w różnych fazach produkcji wyrobów,
- w wyborze opcji dla decydentów, np. w planowaniu czy ustalaniu priorytetów,
- marketingu – pomocna w ekoetykietowaniu lub deklaracjach środowiskowych wyrobów.

Analiza LCA została wykonana przy pomocy programu komputerowego SimaPro wersja 7.3.2. PhD dla pojedynczego samochodowego reaktora katalizacyjnego. Część danych pochodzi z biblioteki CLM Baseline, pozostałe m.in. z firm wydobywających platynowce w RPA czy przedsiębiorstwa produkującego ceramiczne monolity.

Poniżej przedstawiono wyniki symulacji w formie wykresów kolumnowych. Symulacja obejmuje wpływ na następujące oddziaływania: wyczerpywanie surowców mineralnych (abiotic depletion) w [kg Sb eq], zakwaszenie (acidification) w [SO₂ eq], eutrofizacja (eutrophication) [kg PO₄ eq], globalne ocieplenie (global warming GWP 100) [kg CO₂ eq], ubytek warstwy ozonowej (ozone layer depletion ODP) [kg CFC eq], toksyczność dla człowieka (human toxicity) [kg 1,4 – DB eq], ekotoksyczność dla słodkich wód (fresh water aquatic ecotoxicity) [kg 1,4 – DB eq], ekotoksyczność dla słonych wód (marine aquatic ecotoxicity) [kg 1,4 – DB eq], ekotoksyczność lądowa (terrestrialecotoxicity) [kg 1,4 – DB eq] oraz fotochemiczne utlenianie (photochemical oxidation) [kg C₂H₄ eq]. Wykresy zostały przedstawione w skali logarytmicznej ze względu na olbrzymie różnice pomiędzy poszczególnymi wskaźnikami.

Symulacje LCA dla samochodowego reaktora katalizacyjnego podzielone zostały na cztery moduły. Pierwszy z nich to wydobycie i produkcja platynowców. Założono w nim, że danymi wejściowymi będą następujące procesy: wydobycie platynowców, zateżnianie, rafinacja oraz wytapianie. Do dyspozycji były informacje o ilości wytwarzanych antropogenicznych produktów: zużycie prądu i wody, ilość wytwarzanych ścieków i gazów (CO₂). Kolejny moduł jaki został wyszczególniony na potrzeby analizy to produkcja stali i monolitu. Stal jest wykorzystywana na obudowę reaktora, natomiast monolit ceramiczny to „serce” katalizatora, na którym umieszczone są platynowce. Otrzymane dane pozwoliły na opracowanie oddziaływania procesu produkcji dla monolitu ceramicznego w przedsiębiorstwie zlokalizowanym na terenie Polski. Spośród danych, tj. zużycia gazu,

and if they are already, they are severely limited because they have not been thoroughly researched or the manufacturing processes are located in other countries. One of the basic media for any production is electricity. The power industry in Germany is based in less than 50% on coal, while in Poland more than 80%. In Poland we are dealing with an old technology of electricity production, which is based on hard coal and brown coal.



The diagram shown in Figure 3 illustrates the LCA analysis for the extraction and production of PGMs. The most important parameter on which the analysis was based was the consumption of electricity, which in South Africa, as in Poland, is generated by the burning of coal, and the consumption of water in the extraction and production processes is also taken into account. The chart indicates that the greatest risk is the ecotoxicity of saltwater waters, implicitly in marine and ocean waters – 96964930 kg 1.4 – DB eq (99.8% of total impact). The next threat, but to a much smaller scale, is global warming of 72242.19 kg CO₂ (0.074%) and ecotoxicity of freshwater 46225.71 kg 1.4 – DB eq (0.047%) and human toxicity 33914.34 kg respectively. 1.4 – DB eq (0.35%). Definitely the least impact the extraction and production of PGMs has on ozone layer loss of 0.00055 kg CFC ($5.7 \cdot 10^{-10}$ %) and photochemical oxidation 16.63 kg C₂H₄ ($1.7 \cdot 10^{-5}$ %).

prądu, wody, emisji argonu, CO₂, cząstek stałych i pyłów, produkcji odpadów ceramicznych i ścieków, przy ograniczeniach programu SimaPro, można było wykorzystać tylko zużycie gazu, prądu, emisję CO₂ oraz produkcję ścieków. Spowodowane jest to m.in. brakiem w bibliotekach LCA wielu procesów produkcji, a jeśli już są to mocno ograniczone, ponieważ nie zostały dokładnie zbadane albo procesy wytwórcze zlokalizowane są w innych krajach. Jednym z podstawowych mediów do jakiegokolwiek produkcji jest prąd. Energetyka w Niemczech opiera się w niecałych 50% na węglu, natomiast w Polsce ponad 80%. W Polsce mamy do czynienia z przestarzałą technologią produkcji energii elektrycznej, która oparta jest na węglu kamiennym i brunatnym.

Fig. 3. Results of LCA analysis for the extraction and production module of PGMs [7]

Rys. 3. Wyniki analizy LCA dla modułu wydobycie i produkcja platynowców [7]

Wykres przedstawiony na rysunku 3 ilustruje analizę LCA dla wydobycia i produkcji platynowców. Najważniejszym parametrem, na którym oparto analizę było zużycie prądu, który w RPA, podobnie jak w Polsce, wytwarzany jest poprzez spalanie węgla, dodatkowo uwzględnione zostało zużycie wody w procesach wydobycia i produkcji. Wykres wskazuje, że największe zagrożenie niesie ekotoksyczność dla słonych wód, w domyśle wód morskich i oceanicznych – 96964930 kg 1,4 – DB eq (99,8% całkowitego oddziaływania). Następne zagrożenie, choć już w dużo mniejszej skali, stanowi globalne ocieplenie – 72242,19 kg CO₂ (0,074%) oraz odpowiednio ekotoksyczność dla wód słodkich – 46225,71 kg 1,4 – DB eq (0,047%) i toksyczność dla człowieka – 33914,34 kg 1,4 – DB eq (0,35%). Zdecydowanie najmniejszy wpływ wydobycie i produkcja platynowców ma na ubytek warstwy ozonowej – 0,00055 kg CFC ($5,7 \cdot 10^{-10}$ %) oraz fotochemiczne utlenianie – 16,63 kg C₂H₄ ($1,7 \cdot 10^{-5}$ %).

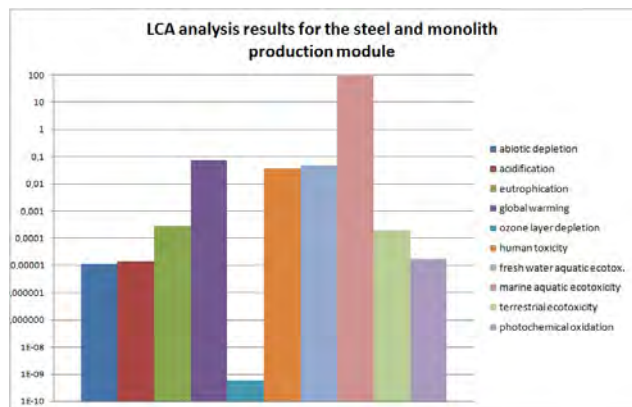


Fig. 4. LCA analysis results for the steel and monolith production module [7]

Rys. 4. Wyniki analizy LCA dla modułu produkcja stali i monolitu [7]

The diagram in Figure 4 shows the ceramic monolith production module. The obtained data from these processes refer to the conditions of production in Poland. The highest impact on ecotoxicity to saltwater waters is 6672460.83 kg 1.4 – DB eq (99.98%), human toxicity 599.60 kg 1.4 – DB eq (0.009%) and ecotoxicity to fresh waters 238.56 kg 1.4 – DB eq (0.0035%). The smallest risk is the ozone layer loss of 0.0000055 kg CO₂ (8.3·10⁻¹¹ %) and photochemical oxidation 0.042 kg C₂H₄ (6.2·10⁻⁷ %).

Wykres na rysunku 4 przedstawia moduł produkcji monolitu ceramicznego. Uzyskane dane z tych procesów dotyczą warunków produkcji w Polsce. Największe oddziaływanie ma ekotoksyczność dla słonych wód – 6672460,83 kg 1,4 – DB eq (99,98%), toksyczność dla człowieka – 599,60 kg 1,4 – DB eq (0,009%) i ekotoksyczność dla słodkich wód – 238,56 kg 1,4 – DB eq (0,0035%). Najmniejsze zagrożenie stanowi ponownie ubytek warstwy ozonowej – 0,0000055 kg CO₂ (8,3·10⁻¹¹%) oraz fotochemiczne utlenianie – 0,042 kg C₂H₄ (6,2·10⁻⁷%).

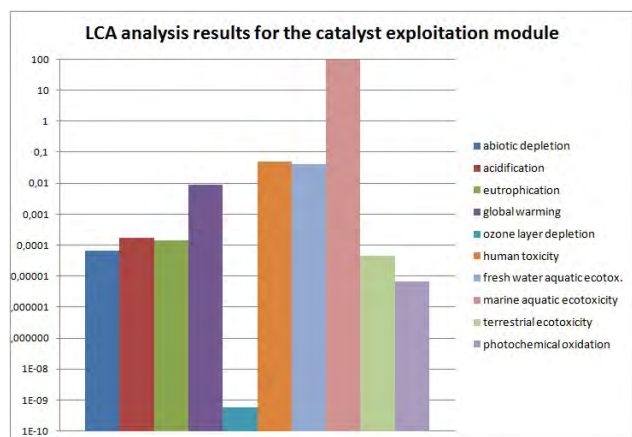


Fig. 5. LCA analysis results for the catalyst exploitation module [7]

Rys. 5. Wyniki analizy LCA dla modułu eksploatacja katalizatora [7]

The column diagram in Figure 5 above shows the catalytic converter operation module. Based on literature, it is assumed that total emissions from catalysts to the environment are 0.004 µg Pt. The results show that the highest hazard is ecotoxicity to saltwater of 0.0013 kg 1.4 – DB eq (99.9%), human toxicity 0.0000007 kg 1.4 – DB eq (0.05%) and Ecotoxicity to freshwater 0.0000006 kg 1.4 – DB eq (0.44%). The lowest risk is the loss of the ozone layer 8.28·10⁻¹⁵ kg CO₂ (6·10⁻¹⁰ %) and photochemical oxidation 9.48·10⁻¹¹ (6.85·10⁻⁶ %).

Wykres kolumnowy znajdujący się na rysunku 5 przedstawia moduł eksploatacji reaktora katalizacyjnego. Na podstawie literatury założono, że emisja całkowita z katalizatorów do środowiska jest na poziomie 0,004 µg Pt. Otrzymane wyniki wskazują, że największe zagrożenie stanowi ekotoksyczność dla wód słonych wynoszące 0,0013 kg 1,4 – DB eq (99,9 %), toksyczność dla człowieka – 0,0000007 kg 1,4 – DB eq (0,05 %) oraz ekotoksyczność dla wód słodkich – 0,0000006 kg 1,4 – DB eq (0,44%). Natomiast najmniejsze zagrożenie stanowi ubytek warstwy ozonowej – 8,28·10⁻¹⁵ kg CO₂ (6·10⁻¹⁰%) oraz fotochemiczne utlenianie – 9,48·10⁻¹¹ (6,85·10⁻⁶%).

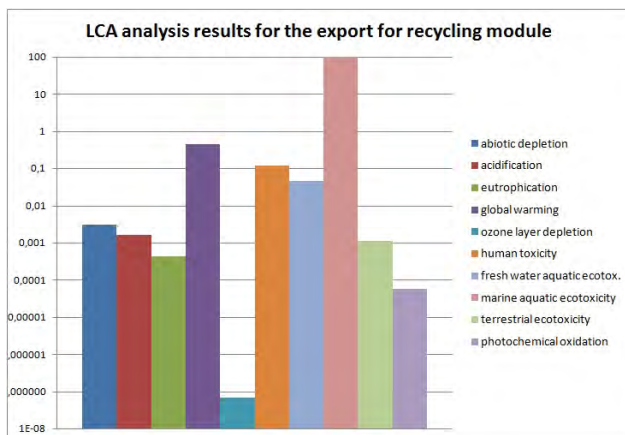


Fig. 6. LCA analysis results for the export for recycling module [7]

Rys. 6. Wyniki analizy LCA dla modułu wywóz na recykling [6]

The diagram presented in Figure 6 is characterized by the last module dealing with the export impact of monoliths in order to recycle PGMs and process steel into steel mills. It was established to export a truck with a capacity of several tons to Germany for a total distance of 1000 km on the assumption of European EURO 4 emission standards. Because the recovery of PGMs from automotive catalytic reactors is carried out, among others. In Germany, I decided to add this module to see how land transport affects the environment. The highest risk is ecotoxicity to saltwater waters 742 kg 1.4 – DB eq (99.4%), global warming 3.27 kg CO₂ (0.44%) and toxicity to humans 0.9 kg 1.4 – DB eq (0.12 %). The smallest impact on the loss of ozone hole is transport 0.0000005 kg CFC (6.64·10⁻⁸ %), photochemical oxidation 0.00042 kg C₂H₄ (5.57·10⁻⁵%) and eutrophication 0.0033 kg PO₄ (0.00044 %).

Wykres przedstawiony na rysunku 6 charakteryzuje ostatni moduł odnoszący się do oddziaływania związanego z wywozem monolitów w celu poddania ich recyklingowi platynowców oraz przerobu stali do hut. Założono wywóz samochodem ciężarowym o pojemności kilku ton do Niemiec, na łączną odległość 1000 km, przy założeniu Europejskich standardów emisji EURO 4. Ponieważ odzysk platynowców z samochodowych reaktorów katalitycznych prowadzony jest m.in. w Niemczech, postanowiono dodać ten moduł, aby sprawdzić, jak transport lądowy wpływa na zagrożenie dla środowiska. Największe zagrożenie to ekotoksyczność dla słonych wód – 742 kg 1,4 – DB eq (99,4 %), globalnego ocieplenia – 3,27 kg CO₂ (0,44%) oraz toksyczność dla człowieka – 0,9 kg 1,4 – DB eq (0,12%). Transport w najmniejszym stopniu wpływa na ubytek warstwy ozonowej – 0,0000005 kg CFC (6,64·10⁻⁸%), fotochemiczne utlenianie – 0,00042 kg C₂H₄ (5,57·10⁻⁵%) oraz eutrofizację – 0,0033 kg PO₄ (0,00044%).

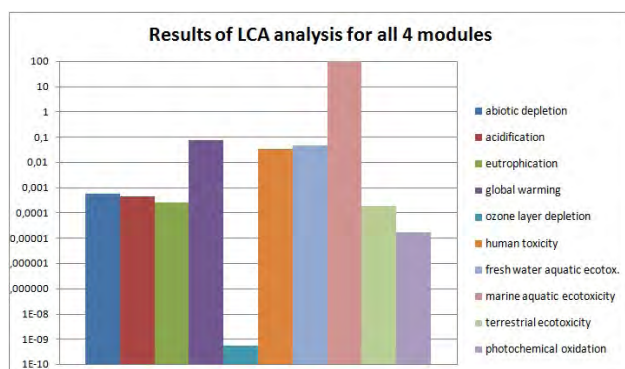


Fig. 7. Results of LCA analysis for all 4 modules [7]

Rys. 7. Wyniki analizy LCA dla wszystkich czterech modułów łącznie [7]

In the graph shown in Figure 7, all four above modules for the automotive catalytic converter are assembled i.e. extraction and production of PGMs, production of steel and ceramic monolith, exploitation of catalyst and transport for recycling

Na wykresie przedstawionym na rysunku 7 zestawiono wszystkie cztery moduły dla samochodowego reaktora katalitycznego, tj. wydobywanie i produkcja platynowców, produkcja stali i monolitu ceramicznego, eksploatacja katalizatora oraz transport w celu

purposes. All these modules significantly affect the environment. Unfortunately, there are a few minor processes to get a complete and pictorial analysis of the product life cycle, because of the lack of data availability, which is often a trade secret of a particular company. From the above available and analyzed modules it is clear that the highest risk is ecotoxicity to saltwater 200449523.7 kg 1.4 – DB eq (99.846%), global warming 144637.20 kg CO₂ (0.072%) and ecotoxicity to fresh waters 92712.3 kg 1.4 – DB eq (0.046%). The smallest impacts were: ozone depletion 0.0011 kg CFC (5.55·10⁻¹⁰%), photochemical oxidation 33.32 kg C₂H₄ (1.66·10⁻⁵ %) and eutrophication 516.49 kg PO₄ (0.00026%).

6. Conclusions

Studies carried out with an electron microscope type (SEM-EDS) and manual fluorescence spectrometer XRF were designed to confirm the presence of PGMs exploited in automotive catalysts. Based on the above analysis, it is difficult to assess whether such recovery is economically justified.

The above article presents the results of the sample analysis LCA. It has demonstrated a clear impact of catalysts on various components of the environment from the time of extraction, production, through the operation and export of catalysts for recovery. Simulation of life cycle assessment is a purely explanatory method, requiring a large amount of input data. You can also use quite limited information in the SimaPro library. It can be said that the extraction of PGMs and their production is an extremely energy consuming process. However, the use of catalysts undoubtedly contributed to the reduction of air pollution, among others. Carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides.

Due to the presence of Poland in the European Union, a common European system of precious metal recovery, including platinum, should be created. In addition, the possibility of catalytic PGMs emissions and their migration into the environment should be further explored. Based on the results of the research, decisions should be made to monitor PGMs in waters and in soil.

This article was based on my master's thesis titled "Car catalytic vehicle - life cycle, evaluation of platinum metals groups and methods of their recovery", defended at the Warsaw University of Life Sciences in 2012 under the supervision of prof.

poddania recyklingowi. Wszystkie te moduły znacznie oddziałują na środowisko. Niestety brakuje kilku drobnych procesów, aby otrzymać pełną i obrazową analizę cyklu życia produktu, ze względu na brak możliwości posiadania danych, które często stanowią tajemnicę handlową danego przedsiębiorstwa. Z powyższych dostępnych i przeanalizowanych modułów wynika, że największym zagrożeniem jest ekotoksyczność dla wód słonych – 200449523,7 kg 1,4 – DB eq (99,846%), globalnego ocieplenia – 144637,20 kg CO₂ (0,072%) oraz ekotoksyczność dla słodkich wód – 92712,3 kg 1,4 – DB eq (0,046%). Natomiast najmniejsze oddziaływania to: ubytek warstwy ozonowej – 0,0011 kg CFC (5,55·10⁻¹⁰%), fotochemiczne utlenienie – 33,32 kg C₂H₄ (1,66·10⁻⁵%) oraz eutrofizacja – 516,49 kg PO₄ (0,00026%).

6. Wnioski

Badania przeprowadzone za pomocą mikroskopu elektronowego typu (SEM-EDS) oraz ręcznego spektrometru fluoroscencyjnego XRF miały na celu potwierdzenie występowania platynowców w wyeksploatowanych katalizatorach samochodowych. Na podstawie powyższych analiz trudno jest przeprowadzić ocenę, czy taki odzysk jest ekonomicznie uzasadniony.

W powyższym artykule przedstawiono wyniki przykładowej analizy LCA. Wykazała ona wyraźne oddziaływanie katalizatorów na różne komponenty środowiska od momentu wydobywania, produkcję, poprzez eksploatację i wywóz katalizatorów do odzysku. Symulacja oceny cyklu życia jest metodą wyłącznie pogładową, obciążoną wymogiem posiadania dużej ilości danych wejściowych. Można również wykorzystać dość ograniczone informacje zawarte w bibliotece programu SimaPro. Na jej podstawie można stwierdzić, że wydobywanie platynowców i ich produkcja jest niezwykle energochłonnym procesem. Jednak niewątpliwie stosowanie katalizatorów przyczyniło się do redukcji zanieczyszczeń do powietrza, m.in. tlenków węgla, węglowodorów oraz tlenków azotu.

Ze względu na obecność Polski w Unii Europejskiej powinno stworzyć się wspólny europejski kompleksowy system odzysku cennych metali, w tym platynowców. Ponadto możliwość emisji platynowców z katalizatorów i migracja ich do środowiska powinna być szerzej przebadana. Na podstawie wyników badań powinno podjąć się decyzje o monitoringu platynowców w wodach oraz w glebie.

Artykuł powstał na bazie pracy magisterskiej mojego autorstwa pt. „*Samochodowy reaktor katalizacyjny – cykl życia, ocena zawartości platynowców i metod*

Dr hab. Eng. Andrzej Świątkowski representing the Military Academy of Technology in Warsaw.

ich odzysku” obronionej w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w 2012 roku pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Andrzeja Świątkowskiego z Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

References

- [1] Bojanowska M. 2005. Wpływ antropogenicznej platyny na elementy środowiska, *Acta Agrophysica* 5(3), s. 535 – 541.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Catalytic_converter [10.05.2016 r. g. 21.00].
- [3] Chodkowska E. M. 2009. Źródła platynowców w żywności pochodzenia zwierzęcego i ich wpływ na zdrowie człowieka, Południowo- Wschodni Oddział Polskiego Towarzystwa Inżynierii Ekologicznej z siedzibą w Rzeszowie i Polskie Towarzystwo Gleboznawcze oddział w Rzeszowie zeszyt nr 11, s. 27 – 32.
- [4] Czora M. i Gambuś F. 2012. Samochodowe reaktory katalityczne oraz ich wpływ na środowisko, *Mechanika czasopismo techniczne*, Wyd. Politechniki Krakowskiej, zeszyt 26, s. 41-56.
- [5] Fornalczyk A., Saternus M. 2007. Recykling zużytych katalizatorów samochodowych, *Rudy Metale* nr 6, s. 326 – 332.
- [6] Fornalczyk A., Saternus M. 2011. Porównanie metod odzysku platyny ze zużytych katalizatorów samochodowych, *Rudy Metale* R56, nr 5, s. 259 – 265.
- [7] Trębacz H. 2012. Samochodowy reaktor katalityczny - cykl życia, ocena zawartości platynowców i metod ich odzysku. Praca magisterska, SGGW, Warszawa.
- [8] Chłopek Z. 2002. Ochrona środowiska naturalnego, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- [9] Sobik. K., Badanie wpływu składowisk odpadów na środowisko gruntowo-wodne na przykładzie wybranych obiektów zlokalizowanych w obrębie zlewni Dunajca. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków, 2007, s.20.
- [10] http://warsztaty.samochodowka.internetdsl.pl/serwishdd/wykaz/oleje_m/oleje_m.htm [18.06.2016 r. g. 22.30].
- [11] Bolewski A., Budkiewicz M., Wyszomirski P. 1991. Surowce ceramiczne, Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- [12] http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/spalanie_wyklad_mechanika/URZADZENIA/SPALANIE_KATALITYCZNE.PDF [22.05.2016 r. g. 23.30].
- [13] Amatayakul W., Ramnas O. 2001. Life cycle assessment of a catalytic converter for passenger cars. *Journal of Cleaner Production* 9 (2001) s. 395 – 403.
- [14] Góralczyk M., Kowalski. Z., Kulczycka J. 2007. Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych, Wyd. PWN, Warszawa.
- [15] Górzyński J. 2007. Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa.

