

INTERDYSKCYPLINARNE BADANIA MŁODYCH NAUKOWCÓW

Pod redakcją naukową
Barbary BALON



GLIWICE 2023

MONOGRAFIA



INTERDYSCYPLINARNE BADANIA MŁODYCH NAUKOWCÓW

**Pod redakcją naukową
Barbary BALON**

**WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
GLIWICE 2023
UIW 48600**

Opiniodawcy

Dr hab. inż. Arkadiusz Gola, prof. Politechniki Lubelskiej
Dr hab. inż. Andrzej Majka, prof. Politechniki Rzeszowskiej

Kolegium redakcyjne

REDAKTOR NACZELNY – Dr hab. inż. Barbara KULESZ, prof. PŚ
REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. Alicja PIASECKA-BELKHAYAT, prof. PŚ
SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Monika MOSZCZYŃSKA-GŁOWACKA

**Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej**

Skład niniejszej monografii stanowią publikacje pokonferencyjne przygotowane przez uczestników konferencji InterTechDOC'23

Redakcja językowa

Mgr Joanna BULSKA

Redakcja techniczna

Ewa TENEROWICZ

Skład i łamanie

Mgr inż. Barbara BALON
Mgr Joanna JENCZEWSKA-PAJKA

Projekt okładki

Mgr inż. arch. Agnieszka MĘDREK

ISBN 978-83-7880-905-0

© Copyright by
Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
Gliwice 2023

SPIS TREŚCI

Nowoczesne zarządzanie projektami przemysłowymi i naukowo-badawczymi ze szczególnym uwzględnieniem technologii informatycznych zarządzania	9
Barbara Balon	
Struktura i właściwości złączy spawanych laserowo ze stali DD11 i DD14	32
Katarzyna Baluch, Maciej Wojtaszak, Katarzyna Łyczkowska	
Wpływ zastosowania idei Szewalskiego na wzrost sprawności turbiny gazowej	48
Oliwia Baszceńska, Kamil Niesporek	
Opracowanie metody doboru cech do modelu uczenia maszynowego prognozującego cenę za usługę transportu drogowego towaru	58
Artur Budzyński	
Emisja pola elektromagnetycznego niskiej częstotliwości przez hulajnogi elektryczne ..	68
Wioletta Cebulska	
Numerical Investigation of the Influence of Sample Geometry on the Accuracy of Electrical Conductivity Measurements Using the Four-Point Probe Method.....	81
Mohsen Dehbashi, Anna Kaźmierczak-Bałata, Wiktoria Szymska, Jerzy Bodzenta	
Innowacyjne aplikacje laserowej obróbki powierzchniowej.....	92
Amadeusz Dziwis	
Rozszerzenie typowego chwytaka przemysłowego o funkcje związane z percepcją otoczenia.....	102
Krzysztof Foit, Marek Witański	
Materiały zmiennofazowe do magazynowania energii cieplnej oparte na związkach pochodzenia naturalnego	113
Magdalena Gwóźdź	
System zarządzania automatyką domową za pomocą sterownika PLC	128
Grzegorz Hanus, Gabriel Kost	
Przegląd piśmiennictwa z zakresu gospodarowania elektroodpadami oraz metod odzysku metali z płyt obwodu drukowanego (PCB)	136
Kamila Hyra, Paweł M. Nuckowski, Waldemar Kwaśny, Tomasz Suponik, Dawid Franke	
An overview of the current status and emerging trends in thermally sprayed barrier coatings.....	165
Amjad Iqbal	

Multimodalne sondy do obrazowania rezonansem magnetycznym $^1\text{H}/^{19}\text{F}$.....	178
Dawid Janasik	
Mapowanie procesów komercjalizacji innowacji w wybranej branży	191
Magdalena Jarzyńska	
Platforma edukacyjna dla osób niewidomych dostosowana do alternatywnej prezentacji grafiki dotykowo-dźwiękowej	207
Mateusz Kawulok, Michał Maćkowski, Adam Ziębiński	
A Short Review on Hot Corrosion of Thermal Barrier Coating Systems	223
Muhammad Jahangir Khan, Amjad Iqbal, Grzegorz Moskal	
Fracture toughness test methods and specimens: A comparative review of recent progress	232
Benard Kipsang, Krzysztof Waclawiak	
The use of hydrogen as aviation fuel. Wykorzystanie wodoru jako paliwa lotniczego..	247
Michał Klimczyk, Jagoda Muszyńska-Pałys	
Przykład syntezy wybranego układu pneumatycznego	258
Adam Kochoński, Agnieszka Sękała	
Niesymetryczne fosfonowo-fosfinowe oraz fosfonowo-fosfinoilowe pochodne 1-amino-1,1-bisfosforowe i metody ich syntezy	274
Dominika Kozicka, Anna Kuźnik	
Characteristics of the abrasives used in grinding of spiral bevel gears.....	288
Kamil Kucharski	
Synteza i zastosowanie aktywnych biologicznie pochodnych 1,2,4-triazolu	301
Marcin Łuczyński	
Symulacja komputerowa wpływu materiału wykorzystanego do produkcji strefy zgniotu w samochodzie osobowym na bezpieczeństwo kierowcy.....	321
Wojciech Mikołajko	
Alternatywna metoda analizy wyników symulacji MES w oprogramowaniu CAD bez zaawansowanych narzędzi postprocesingu	330
Paweł Pac, Jarosław Tokarczyk, Dariusz Prostański, Agnieszka Sękała, Piotr Rosikowski	
Proces wytwarzania poszycia fotela samochodowego, dobór i ocena parametrów wpływających na jakość poszycia	345
Wiktoria Piętakiewicz	
Pomiar potencjału komercjalizacji projektów rozwojowych na przykładzie Łukasiewicz – GIT	357
Wioleta Rakowska, Aleksander Gwiazda	
IoNanoFluids – kompozycja cieczy jonowych oraz nanomateriałów węglowych w kierunku supersmarowności.....	368
Szymon Ruczka, Sławomir Boncel	

Sposoby identyfikacji pojazdów szynowych w aspekcie wykorzystania pojemności informacyjnej sygnałów wibroakustycznych.....	379
Paweł Słowiński	
Koncepcja wykorzystania stawów słonecznych jako magazynów energii cieplnej.....	399
Jakub Szykowski, Magdalena Borowska, Kamila Szykowska, Grzegorz Wiciak	
Wpływ metody spawania na rozkład temperatur spawanych rur stalowych z wykładkami kompozytowymi.....	410
Sławomir Topór	

Contents

Modern management of industrial and scientific-research projects with particular emphasis on information technology management	9
Barbara Balon	
Structure and properties of laser-welded joints of DD11 and DD14 steels	32
Katarzyna Baluch, Maciej Wojtaszak, Katarzyna Łyczkowska	
Influence of the application of the Szewalski's idea on the increase in efficiency of a gas turbine	48
Oliwia Baszczęńska, Kamil Niesporek	
Development of a method for selecting features for a machine learning model forecasting the price for road transport of goods	58
Artur Budzyński	
Emission of low-frequency electromagnetic field by electric scooters	68
Wioletta Cebulska	
Numerical investigation of the influence of sample geometry on the accuracy of electrical conductivity measurements using the four-point probe method	81
Mohsen Dehbashi, Anna Kaźmierczak-Bałata, Wiktoria Szynska, Jerzy Bodzenta	
Innovative laser surface treatment applications	92
Amadeusz Dziwis	
Extension of the typical industrial gripper by functions related to the perception of the environment	102
Krzysztof Foit, Marek Witański	
Biomass derived phase change materials for storing thermal Energy	113
Magdalena Gwóźdź	
Home automation management system with PLC	128
Grzegorz Hanus, Gabriel Kost	
A case study of literature in the field of electronic waste management and metals recovery methods from printed circuit boards (PCBS)	136
Kamila Hyra, Paweł M. Nuckowski, Waldemar Kwaśny, Tomasz Suponik, Dawid Franke	
An overview of the current status and emerging trends in thermally sprayed barrier coatings	165
Amjad Iqbal	

Multimodal probes for $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ magnetic resonance imaging	178
Dawid Janasik	
Mapping the commercialization processes of innovations in a selected industry	191
Magdalena Jarzyńska	
An educational platform for the blind adapted to the alternative presentation of audio-tactile graphics	207
Mateusz Kawulok, Michał Maćkowski, Adam Ziębiński	
A short review on hot corrosion of thermal barrier coating systems	223
Muhammad Jahangir Khan, Amjad Iqbal, Gregorz Moskal	
Fracture toughness test methods and specimens: a comparative review of recent progres	232
Benard Kipsang, Krzysztof Waclawiak	
The use of hydrogen as aviation fuel	247
Michał Klimczyk, Jagoda Muszyńska-Pałys	
An example of the synthesis of a selected pneumatic system	258
Adam Kochoński, Agnieszka Sękała	
Asymmetrical phosphonyl-phosphinyl and phosphonyl-phosphinoyl 1-amino-1,1-bisphosphoric derivatives and methods for their synthesis	274
Dominika Kozicka, Anna Kuźnik	
Characteristics of the abrasives used in grinding of spiral bevel gears	288
Kamil Kucharski	
Synthesis and application of biologically active derivatives of 1,2,4-triazole	301
Marcin Łuczyński	
Computer simulation of the impact of the material used for the crumple zone in a passenger car on driver safety	321
Wojciech Mikołajko	
An alternative method of analyzing fem simulation results in CAD Software without advanced post-processing tools	330
Paweł Pac, Jarosław Tokarczyk, Dariusz Prostański, Agnieszka Sękała, Piotr Rosikowski	
Manufacturing proces of the car seat cover, selection and evaluation of parameters affecting the quality of the car seat cover	345
Wiktoria Piętakiewicz	
The measurement of commercialization capability based on the development projects at Łukasiewicz research network – upper silesian institute od technology	357
Wioleta Rakowska, Aleksander Gwiazda	
Ionanofluids – composition of ionic liquid and carbon nanomaterials towards superlubricity	368
Szymon Ruczka, Sławomir Boncel	

Ways of identifying rail vehicles in terms of using the information capacity of vibroacoustic signals	379
Paweł Słowiński	
The concept of using solar ponds as thermal energy storage	399
Jakub Szykowski, Magdalena Borowska, Kamila Szykowska, Grzegorz Wiciak	
Influence of the welding method on the temperature distribution of welded steel pipes with composite lining	410
Sławomir Topór	

Barbara BALON¹

NOWOCZESNE ZARZĄDZANIE PROJEKTAMI PRZEMYSŁOWYMI I NAUKOWO-BADAWCZYMI ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH ZARZĄDZANIA

1. Wstęp

Współczesny świat niemal całkowicie przeniósł się do wnętrza komputerów, nie tylko do sfery Internetu, ale także baz danych, programów obsługi maszyn, sprzętów AGD, skomplikowanych procesów logistycznych, magazynowych i handlowych. Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat umiejętność skutecznego zarządzania projektami (ang. *project management*) nabrała ogromnego znaczenia. Wraz ze światowym postępem technologicznym zmienia się profil postrzegania biznesu, dla którego prawidłowe funkcjonowanie uwarunkowane jest profesjonalizmem przeprowadzonych projektów, wdrożonych systemów informatycznych, poziomu ich wykorzystania, zaawansowania obsługi i funkcjonalności. Konieczność zwinnego zarządzania projektami znacząco wpłynęła na kierunki rozwoju współczesnych firm. Umiejętne zarządzanie potęguje konieczność modyfikacji sprzętu komputerowego i stosowania nowoczesnych algorytmów w przetwarzaniu danych. Aby zwiększyć szanse powodzenia projektu, a tym samym sukces firmy, potrzebne są odpowiednie metody zarządzania postępowaniem prac, w których miarą nowoczesności, a nawet innowacyjności, jest cyfryzacja powszechnie stosowanych form zarządczych, które uznaje się za fundamentalną i najdynamiczniej zachodzącą zmianę XXI wieku [1]. To postęp informatyczny zmienia sposób powszechnie znanego kierowania biznesem, coraz więcej w nim nowości technologicznych i działań promowanych jako funkcjonowanie w chmurze. Szczegółowo zaplanowany i prawidłowo prowadzony proces zarządzania z wykorzystaniem właściwie dobranych metod i technik może przyczynić się do osiągnięcia wielu korzyści ekonomicznych, poprawy skuteczności podejmowanych decyzji, wzrostu kapitału intelektualnego oraz zwiększenia odpowiedzialności wśród pracowników [2]. Zarządzanie projektami przemysłowymi powinno

¹ barbara.balon@polsl.pl, Katedra Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska.

być traktowane jako środek zbliżający przedsiębiorstwo do osiągnięcia celu, dlatego wybór metodyki, która umożliwi firmie realizację projektu możliwie najszybciej, najtaniej i najskuteczniej, jest kluczowym punktem wyjścia do osiągnięcia sukcesu projektu.

2. Cel

Niniejszy artykuł stanowi przegląd zagadnień dotyczących nowoczesnego podejścia do zarządzania projektami, a jego celem głównym jest przybliżenie czytelnikowi tematyki zarządzania projektami ze szczególnym uwzględnieniem technik informatycznych zarządzania, technologii BIM, blockchain i tożsamyh. Podstawową metodą badawczą jest analiza opracowań i artykułów naukowych poświęconych analizowanej problematyce, zarówno krajowych, jak i zagranicznych, oraz zaproponowanie własnej architektury dla współdzielenia danych projektowych z zastosowaniem założeń Technologii Blockchain.

Na strukturę artykułu składa się wstęp, wyjaśnienie pojęcia zarządzania projektem, przybliżenie zakresu informatyzacji oraz celowości ucyfrowienia powszechnie stosowanych metod zarządzania projektami, a także przedstawienie rozwoju metod i technik cyfrowego zarządzania projektami. W kolejnych sekcjach omówiono projekty badawczo-rozwojowe i zarządzanie nimi oraz przybliżono sposób wykorzystania technologii łańcucha bloków w procesach projektowych. Całość zwięźczono podsumowaniem oraz nakreśleniem kierunków dalszych prac badawczyh.

3. Geneza zarządzania projektami

Konsekwencją wzmożonego zainteresowania tematem zarządzania projektami jest upowszechnianie wiedzy dot. tworzenia i wdrażania nowych koncepcji, narzędzi, modeli i standardów projektowych [3]. Poziom zaawansowania w zarządzaniu projektami kształtował się wraz z rozwojem cywilizacji, począwszy od egipskich piramid, poprzez linie kolejowe, drapacze chmur, tajne operacje wojskowe aż po misje kosmiczne [4]. Za prekursorów tematu zarządzania projektami warto uznać starożytne społeczeństwa, zwłaszcza Sumerów, Babilończyków, Rzymian, Egipcjan czy Chińczyków [5]. Wiek XX przyniósł świadomość dotyczącą systematyzacji wiedzy na temat zarządzania projektami i zainspirował do stworzenia ich metodologii. Bez wątpienia przyczynili się do owego procesu dwaj badacze: Frederick W. Taylor oraz Henry Gantt. Pierwszy, prowadząc badania nad wydajnością pracowników, wywnioskował, że jedynym sposobem polepszenia efektywności było wymaganie od zatrudnionych cięższej i dłuższej pracy i na tej podstawie opracował pojęcie

wydajności pracy. Drugi skupił się na analizach szeregowości realizowanych zadań. Wynikiem jego analiz są powszechnie stosowane wykresy Gantta, które obrazują graficzny rozkład czynności w czasie dla całego projektu [6].

Wraz z postępem technologicznym wzrasta konieczność stosowania skutecznych narzędzi organizacji pracy i elastycznego podejścia do zarządzania. Bez względu na rodzaj prowadzonej działalności czołowe firmy każdej branży nieustannie poszukują nowych strategii konkurencyjności oraz wydajnych technik wspomagających procesy kierownicze [7]. Ogromny wkład w opracowanie standardów w zakresie zarządzania projektami mają światowe stowarzyszenia doradców. Wśród nich prym wiodą Project Management Institute (PMI) oraz International Project Management Association (IPMA) [8]. Przewodnik Project Management Institute [9] projekt opisuje jako „tymczasowe przedsięwzięcie podejmowane w celu wytworzenia unikatowego wyrobu, dostarczenia unikatowej usługi lub uzyskania unikatowego rezultatu”. To samo źródło określa zarządzanie projektami jako: „zastosowanie wiedzy, umiejętności, narzędzi i technik dla funkcjonowania projektów i spełnienia ich wymogów”. Główne parametry projektu to jego powodzenie lub niepowodzenie oraz czas i koszty realizacji [10]. Współczesne koncepcje zarządzania, do których warto zaliczyć: Business Process Reengineering (BPR), Lean Management, Lean Production (Manufacturing), Total Quality Management (TQM), Just In Time, Marketing, Logistyka, Controlling, Human Resources Management, Benchmarking, Outsourcing, charakteryzują się podejściem przekrojowym, czyli przenikającym przez różne obszary działalności przedsiębiorstwa, a nawet poza nie.

4. Zarządzanie projektami

Współcześnie podejmuje się coraz więcej starań prowadzących do uproszczenia procesu zarządzania projektami. Wszystko po to, aby zarządzanie nimi nie było jedynie domeną specjalistów, lecz znajdowało się w zasięgu każdego przedsiębiorstwa [3, 47, 48]. Celem podjęcia właściwych kroków w zarządzaniu projektami jest określenie ich wymagań, utrzymanie równowagi między zakresem, jakością, harmonogramem, budżetem, zasobem a ryzykiem powodzenia lub niepowodzenia [49].

Każdy projekt składa się z faz i etapów realizacji, a jego sekwencje określa się jako cykl życia projektu [11]. Pierwsza faza to inicjacja projektu, czyli analiza potrzeb i problemów, wyznaczenie celów, określanie niezbędnych zasobów i środków, w tym zespołu ludzkiego. Konieczne jest zwłaszcza wyznaczenie zakresu projektu [12]. Faza planowania to faza druga. Ustala się w niej dokładny zakres projektu, jego strukturę oraz przełomowe momenty realizacji, tzw. kamienie milowe. Ponadto należy opracować plan finansowy oraz rozłożenie projektu w czasie. Kolejna faza to realizacja i kontrola, w której następuje sterowanie wykonywaniem zadań oraz ich kontrolowanie. Ostatni etap realizacji projektu to zakończenie, czyli prezentacja wyników i porównanie z przyjętymi celami oraz podsumowanie i rozliczenie.

Obecne badania naukowe prowadzone są w kierunku zarządzania procesowego [13–15], czyli podejścia do funkcjonowania przedsiębiorstw, w którym podejmowane i realizowane procesy będą zaspokajać zgłaszane przez klienta indywidualne zapotrzebowanie.

Nowoczesność znanych i powszechnie stosowanych metod zarządczych polega w głównej mierze na ich cyfryzacji, czyli przystosowaniu istniejących rozwiązań do schematów nowoczesności [16]. Pojęcie cyfryzacja [17] przez badaczy określana jest jako „działanie z użyciem narzędzi cyfrowych, których celem jest zwiększenie produktywności i przyspieszenie wzrostu gospodarczego” [18], inny pogląd stanowi utożsamianie jej z kolejną rewolucją przemysłową [19, 20] czy też „proces reorganizacji przedsiębiorstwa w celu digitalizacji działalności przy wykorzystaniu pełnego potencjału technologii informatycznych w całym łańcuchu dostaw” [21–23].

Rozszerzona rzeczywistość, Internet Rzeczy czy zarządzanie danymi w chmurze to aktualni przewodnicy w transformacji ku nowoczesności w zarządzaniu projektami. Główne czynniki uaktywniające powstanie nowoczesnej rzeczywistości gospodarczej to: robotyzacja, sztuczna inteligencja oraz cyfrowe technologie transformacyjne (Internet of Things, 5G, blockchain, Big Data) [24–26]. Opierając się na własnych badaniach The Standish Group International opublikowała listę najważniejszych czynników odpowiadających za sukces projektu [50]. Są nimi:

- jasny cel biznesowy projektu (sprecyzowane wymagania w świetle istniejących ograniczeń),
- doświadczony i kompetentny kierownik projektu,
- wykształcone zasoby ludzkie,
- formalna metodyka prowadzenia projektu,
- zaangażowanie klienta w realizację projektu,
- wsparcie kierownictwa (sponsora) projektu,
- zoptymalizowany zakres projektu (dostosowany do możliwości wykonania),
- metodyka zwinnego projektowania (agile) w miejsce tradycyjnego,
- prawidłowe zarządzanie budżetem projektu,
- standardowe narzędzia programistyczne i infrastruktura.

5. Podstawowe podejścia do zarządzania projektami

Współczesne organizacje, dążące do unowocześniania zakresu swojej działalności w pogoni za nieustannie zmieniającym się otoczeniem oraz skróceniem czasu wytwarzania nowych produktów i usług, decydują się na zastosowanie sprawdzonych i uporządkowanych metod z zakresu zarządzania projektami. Wśród tradycyjnych podejść na szczególną uwagę zasługują: PRINCE2, PMI, IPMA oraz SCRUM [27].

Metoda PRINCE2 (ang. *Projects IN Controlled Environments*) to publicznie dostępna na całym świecie i najszerzej akceptowana metoda zarządzania projektami. Jej oryginalność polega głównie na możliwości zastosowania do realizacji w przedsiębiorstwach niemal każdej branży i niezależnie od skali oraz rodzaju przedsięwzięcia. Jej założenia po raz pierwszy ogłoszono w 1989 r. w Wielkiej Brytanii w wyniku doświadczeń agencji rządowej Central Computer and Telecommunications Agency (CCTA). Metodyka PRINCE2 określa role niezbędne do zarządzania przedsięwzięciem. Wyznacza obowiązki, odpowiedzialność decyzyjną i odpowiedzialność wykonawczą.

Project Management Institute (PMI) to amerykańskie stowarzyszenie branżowe, które jest obecnie największą globalną organizacją zrzeszającą osoby związane z zarządzaniem projektami. Z uwagi na swobodę implementacji znajduje zastosowanie w dużych korporacjach sektora prywatnego oraz dostarcza informacji z obszarów poza projektowych (zagadnień komunikacyjnych, zaopatrzeniowych i międzyludzkich) [28].

International Project Management Association (IPMA) zapoczątkowano w 1965 r. jako organizację non profit. W swoich założeniach nie definiuje procesów i technik zarządzania projektami, wskazuje natomiast kompetencje skupione na trzech obszarach (kompetencje techniczne, kompetencje behawioralne, kompetencje kontekstowe), ponadto opiera się na dobrych praktykach, elastycznym dostosowywaniu rozwiązań do potrzeb konkretnego podmiotu, skupia się na technikach definiowania, planowania i controllingu projektu [29].

SCRUM to metoda pozwalająca na organizację pracy w projektach w sposób, który umożliwi szybkie i bezproblemowe dokonywanie w nim zmian na dowolnym etapie realizacji, stosuje twarde zależności pomiędzy maksymalnie elastycznym systemem informatycznym a zespołem projektowym. Nadrzędna wartość owej metodyki to zwinna filozofia pracy i jej wartości, czyli: podejście empiryczne, oswojenie zmian, obserwacja i adaptacja, autonomia, przejrzystość, tolerowanie porażek, kultura ciągłego uczenia się, innowacyjność, samoorganizacja, zabieganie o klientów. Potęgujące wymagania globalnego rynku przyczyniają się do podniesienia świadomości zasadności kompleksowego zarządzania projektami. Na przestrzeni lat ewoluowało przekonanie dotyczące stosowania metod zarządczych jedynie do dużych i skomplikowanych projektów. W celu zrozumienia istotności tematu w tabeli 1 zestawiono podejście wcześniejsze oraz współczesne opinie na temat zarządzania projektami [51].

Wczesniejsze oraz współczesne opinie na temat zarządzania projektami

Wczesniejsze opinie	<ul style="list-style-type: none"> • wymaga większej liczby osób • powoduje wzrost kosztów • prowadzi do możliwego spadku rentowności • skutkuje wzrostem liczby zmian zakresu • destabilizuje organizację i zwiększa liczbę konfliktów • stwarza problemy • zasadne jest tylko w wypadku dużych projektów • wpływa na pogorszenie jakości • powoduje problemy z zależnościami hierarchicznymi i uprawnieniami kadry • prowadzi do cząstkowej optymalizacji ograniczającej się jedynie do niektórych projektów • pozwala dostarczać produkty klientom • jego koszty mogą przyczynić się do zmniejszenia konkurencyjności firmy 	<ul style="list-style-type: none"> • pozwala wykonać więcej pracy w krótszym czasie i przy pomocy mniejszej liczby osób • prowadzi do wzrostu rentowności • umożliwia lepszą kontrolę zmian zakresu • sprawia, że firma jest skuteczniejsza i bardziej wydajna dzięki lepszym zasadom zachowań organizacyjnych • pozwala na bliższą współpracę z klientami • dostarcza skutecznych metod rozwiązywania problemów • przynosi korzyści we wszystkich projektach • poprawia jakość produktów i działań • pomaga w procesach decyzyjnych właściwych z punktu widzenia całego przedsiębiorstwa • zwiększa zasięg działalności firmy 	Współczesne opinie
---------------------	--	--	--------------------

Źródło: Kerzner H., *Advanced Project Management, edycja polska*, Helion, Gliwice 2005

6. Projekty badawczo-rozwojowe

Zgodnie z definicją przedstawioną w Podręczniku Frascati działalność badawcza i rozwojowa to systematycznie prowadzone prace twórcze, podejmowane w celu zwiększenia zasobów wiedzy, w tym wiedzy o człowieku, kulturze i społeczeństwie, oraz wykorzystywanie tej wiedzy do tworzenia nowych zastosowań i rozwiązań [52]. Badania naukowe można sklasyfikować w trzech grupach:

- badania podstawowe (ang. *basic research*) – prowadzone z uwzględnieniem teorii i eksperymentów; ich głównym celem jest zwiększanie zasobu wiedzy o przyczynach zjawisk i zdarzeń;

- badania stosowane (ang. *applied research*) – ich zadaniem jest dostarczenie nowej wiedzy pozwalającej na osiągnięcie założonych celów praktycznych lub znalezienie zastosowań dla wyników badań podstawowych;
- badania przemysłowe – ich celem jest pozyskanie wiedzy i umiejętności do opracowania nowych produktów, procesów lub usług.

Prace rozwojowe należy traktować jako (ang. *experimental development*) działania mające na celu wykorzystanie istniejącego zasobu wiedzy do planowania produkcji oraz tworzenia i projektowania nowych lub ulepszania istniejących produktów, procesów lub usług oraz przygotowanie prototypów, produkcję eksperymentalną i testową produktów, procesów i usług. Warto w tym miejscu zwrócić szczególną uwagę na wdrożenia, gdyż wraz z badaniami i rozwojem tworzą innowacyjne podejście projektowe: B+R+W² [53]. Innowację w przytoczonym przykładzie należy umiejscowić w obszarze zarówno badawczo-rozwojowym, jak i produkcyjnym. Powstanie każdej innowacji poprzedzają prace twórcze i myślowe o wysokim stopniu ryzyka i niepewności [54]. Z analiz przeprowadzonych przez zespół pod kierownictwem Keitha Pavitta wynika, że na proces zwieńczony udaną innowacją składają się następujące fazy [69]:

- analiza otoczenia w celu identyfikacji sygnałów rynkowych,
- podjęcie strategicznego wyboru wariantu odpowiadającego zidentyfikowanym sygnałom,
- wygospodarowanie zasobów niezbędnych do realizacji projektu,
- wdrażanie projektu na każdym etapie jego powstawania (od pomysłu do wprowadzenia na rynek),
- uczenie się przez doświadczenie.

7. Zarządzanie projektami badawczymi

Projekt jest sekwencją zdarzeń, jakie podejmuje się w związku z zamiarem osiągnięcia sprecyzowanych i niepowtarzalnych celów w zadanym czasie [55]. Na podstawie [56] wyróżnia się cztery rodzaje projektów:

- projekty inżynierskie, konstrukcyjne, petrochemiczne, górnicze i wydobywcze – to projekty kosztowne i obciążone dużym ryzykiem,
- projekty produkcyjne – służą do opracowania produktu, zwykle poprzedzone etapem badawczo-rozwojowym, z uwagi na udział wielu wykonawców, często w ramach konsorcjów lub kontraktów międzynarodowych, należą do skomplikowanych,
- projekty IT i projekty związane z zarządzaniem zmianą – projekty zarządcze służące rozwojowi lub poprawie funkcjonowania organizacji, najczęściej wiążą się z wysokimi nakładami finansowymi,

² B (badania), R (rozwój), W (wdrożenie).

- projekty naukowe (z wyłączeniem projektów B+R) – ich głównym celem jest poszerzanie wiedzy, łączą się z bardzo wysokim ryzykiem.

Zarządzanie projektem badawczym tożsame jest:

- z wykorzystaniem wiedzy, umiejętności, narzędzi i technik [57],
- z procesami alokacji zasobów i planowania dla osiągnięcia określonego celu w sposób skuteczny i najkrótszy [58];
- ze zbiorem procesów zarządczych (w tym: inicjowanie projektu, planowanie, wykonywanie, kontrola i zakończenie projektu) [59].

8. Rozwój metod i technik zarządzania projektami badawczo-rozwojowymi

Pojawienie się narzędzi wykorzystywanych do zarządzania projektami datuje się na czas zimnej wojny, kiedy ich rozwój zawdzięcza się kierowanym wówczas projektom wojskowym. Kolejno w latach 60. XX wieku w projekcie Polaris opracowano technikę oceny i kontroli PERT (ang. *Program Evaluation and Review Technique*) wykorzystywaną do prac nad raketami balistycznymi. PERT znajduje zastosowanie głównie przy procesach niepowtarzalnych, w których można oszacować jedynie czas trwania i terminy zakończenia zadań składowych. Do procesów powtarzalnych, w których terminy realizacji zadań częściowych są stałe, zastosowanie znajduje metoda ścieżki krytycznej CPM (ang. *Critical Path Method*) opracowana przez DuPont [60]. Rozwijanie PERT i CPM umożliwiło stworzenie uogólnionych modeli planistycznych dla projektów realizowanych metodami sieciowymi takich jak GERT (ang. *Graphical Evaluation and Review Technique*).

Zarządzanie projektami badawczymi wzmocniło swoje znaczenie na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku. Wówczas menedżerowie przedsiębiorstw z krajów wysoko rozwiniętych dostrzegli skuteczność zarządzania projektowego w kierowaniu przedsiębiorstwem. Ich determinacja do tycząca rozwoju tematu wpłynęła na otoczenie gospodarcze w postaci prowadzenia sprawnych i efektywnych przedsięwzięć. Jedną z głównych zalet projektowego podejścia do zarządzania projektami przemysłowymi jest możliwość ich scalania z innymi systemami zarządzania, w tym głównie [51]:

- projektowanie współbieżne – jednoczesne wykonywanie działań, które wcześniej były sekwencyjne; znajduje zastosowanie w skomplikowanych projektach, w których uczestniczą duże zespoły,
- kompleksowe zarządzanie jakością,
- zarządzaniem ryzykiem,
- zarządzaniem zmianami.

Związki zarządzania projektami z innymi systemami zarządzania zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Zarządzanie projektami w odniesieniu do innych systemów zarządzania

Systemy zarządzania	Projektowanie współbieżne + zarządzanie projektem	<ul style="list-style-type: none"> • skrócenie czasu rozwoju dla nowych produktów • przedłużenie przeciętnego cyklu życia produktu • zwiększenie sprzedaży i przychodów • rozszerzenie liczby klientów • ograniczenie zmian w dokumentacjach technicznych • skrócenie czasu wprowadzenia produktu na rynek • ograniczenie nakładów pracy na wprowadzanie poprawek 	Czynniki
	Zarządzanie zmianami + zarządzanie projektem	<ul style="list-style-type: none"> • zdolność szybkiego reagowania na żądania zmian zgłaszane przez klientów • zmniejszenie wpływu zmian na budżet i harmonogram projektu • poprawienie relacji z klientami i zwiększenie ich zadowolenia 	
	Zarządzanie ryzykiem + zarządzanie projektem	<ul style="list-style-type: none"> • ulepszone procedury identyfikacji ryzyka • ulepszone procedury identyfikacji oceny ilościowej ryzyka • skuteczniejsze procesy podejmowania decyzji i reakcji na występujące ryzyko • precyzyjne określenie stron odpowiedzialnych w ramach umów za zarządzanie ryzykiem w umowach 	
	Kompleksowe zarządzanie jakością + zarządzanie projektem	<ul style="list-style-type: none"> • wyższa jakość produktów • wyższy wskaźnik zadowolenia klientów • mniejsza liczba niepowodzeń wewnętrznych i zewnętrznych • zmniejszenie liczby odrzutów w produkcji • ograniczenie liczby reklamacji i napraw gwarancyjnych 	

Źródło: Kerzner H., *Advanced Project Management, edycja polska*, Helion, Gliwice 2005

9. Cyfrowe zarządzanie projektami

W nowoczesnym zarządzaniu projektami dane cyfrowe zbierane na każdym etapie procesów twórczych stanowią jeden z najważniejszych elementów zarządczych. Czynniki wpływające na unowocześnienie procesów zarządzania to głównie [30, 31]:

- poziom rozwoju informatyzacji w produktach i usługach,
- uwzględnienie wiedzy i kapitału intelektualnego jako podstawy budowania relacji biznesowych,
- poprawa jakości pracy, efektywności i skuteczności działania,
- poziom rozwoju metod i technik analizy danych,
- zaufanie pracodawców i pracowników do technologii,
- gotowość do pracy w „cyfrowym” otoczeniu,
- znajomość języków programowania i cyberbezpieczeństwa,
- gotowość biznesu do zmiany modelu zarządzania,
- poziom wiedzy z zakresu nowoczesnych metod projektowania,
- usprawnienie komunikacji wewnątrz organizacji i poza nią,
- redukcja i optymalizacja kosztów oraz wzrost wydajności i produktywności.

Zasady, którymi należy kierować się w procesie unowocześniania procesów zarządzania projektami, są następujące [32]:

- pracownicy każdego szczebla znają zadania i cele przedsiębiorstwa,
- pracownicy uczą się na podstawie pozytywnych i negatywnych doświadczeń swoich i swoich współpracowników,
- kierownictwo na równi z pracownikami wykazuje aktywne zaangażowanie i przywództwo,
- efektywna praca i dążenie do nieustannej poprawy jakości obejmują cały proces projektowania,
- bieżące dokonywanie oceny realizowanych projektów³.

Spośród działań zmierzających do doskonalenia funkcjonowania organizacji i realizowanych w niej projektów warto wyróżnić także: zwiększenie zainteresowania nauką, pomoc w zrozumieniu potrzeb klienta, zniwelowanie dystansu pomiędzy globalizmem a lokalnością oraz pomiędzy tradycją a nowoczesnością [33, 34].

10. Technologie informatyczne zarządzania

Teoretycy zajmujący się informatyką ekonomiczną za początek powstania systemów informacyjnych wspomagających zarządzanie uznają moment pojawienia się i kolejno komercyjnej sprzedaży komputera (1951 r.). Jego pierwsza sztuka trafiła do Biura Ewidencji

³ Zapewnia to stałe wzmocnienie i wspieranie struktury organizacji, procedur, systemów, mechanizmów służących tworzeniu programów doskonalących.

Ludności w USA. Fakt ten zapoczątkował adaptacje komputerowe oparte na systemach przetwarzania transakcyjnego (ang. *Transactional Processing Data Systems* – TPS lub inaczej *Automation Data Processing* – ADP – systemy automatyzacji przetwarzania danych), dotyczące pojedynczych, prostych systemów ewidencyjnych typu listy płac, wydruków rachunków, zestawień statystycznych, czyli wszystkiego, co firmom pomagało w codziennym funkcjonowaniu [61]. Początki systemów informatycznych, z uwagi na kosztochłonne, separowane i niekompilacyjne systemy, nie były jednak łatwe do przyswojenia dla użytkowników. Dopiero ponad dekadę później postęp techniki spowodował wzrost mocy obliczeniowej komputerów, rozwój oprogramowania oraz nowych technik gromadzenia danych uzyskanych na wyjściu systemów transakcyjnych, które zaczęły służyć w procesach planowania i kontroli. Czynniki te spowodowały powstanie nowej klasy oprogramowania użytkowego, które umożliwiała fakturowanie, rejestrację opłat i zakupów, ewidencję stanów magazynowych, inwentaryzację i rachunkowość. Systemom tym nadano nazwę – systemy informacyjne zarządzania (ang. *MIS – Management Information Systems*). Kolejne etapy rozwoju systemów informatycznych kształtowały się następująco [62]:

- transakcyjne systemy przetwarzania (ang. *TSP – Transactional Processing Data Systems* – od 1951 r.),
- systemy informacyjne zarządzania (ang. *MIS – Management Information Systems* – od 1964 r.),
- systemy wspomagające podejmowanie decyzji (ang. *DSS – Decision Support Systems* – od 1978 r.),
- systemy informowania kierownictwa (systemy informacyjne kierownictwa – ang. *EIS – Executive Information Systems* i systemy wspomagania kierownictwa – ang. *ESS – Executive Support Systems* – od 1980 r.),
- systemy eksperckie (ang. *ES – Expert Systems* – I generacja – od 1975 r., II generacja – od 1985 r.),
- systemy *Business Intelligence* (ang. *Business Intelligence Systems* – od 1990 r.).

11. Zarządzanie projektem z zastosowaniem Technologii Blockchain

W sytuacji gdy istnieje konieczność udostępnienia danych cyfrowych projektów podmiotom zewnętrznym, pojawia się potrzeba zaufania i weryfikacji w dostępie do zasobów. W taki schemat idealnie wpisuje się **Technologia Blockchain**, którą można z powodzeniem wykorzystać do ułatwienia współpracy podmiotom tworzącym wspólny projekt przez zapewnienie integralności udostępnianych i pobieranych przez nich danych.

Blockchain (pol. łańcuch bloków) – zbiór danych stworzony z wykorzystaniem technologii rozproszonego rejestru, zawierający informacje pogrupowane w powiązane ze sobą bloki.

Każdy blok wiąże się z poprzednim za pomocą skrót (ang. hash), inaczej linku do poprzedniego bloku, oraz znacznika czasu (ang. time stamp) określającego czas utworzenia skrótu [63]. Blockchain to inaczej rozproszona, zbiorowa baza danych, umożliwiająca ich gromadzenie oraz komunikowanie się dzięki rejestracji informacji przez komputery należące do tej samej sieci.

Aby kompleksowo dostosować się do potrzeb w zakresie cyberbezpieczeństwa i poufności danych, łańcuch bloków może przyjąć formę jednej z trzech jego struktur [64]:

- publicznej (bez zezwolenia – dostępna dla wszystkich użytkowników zalogowanych w danej sieci i zaimplementowana za pośrednictwem sieci peer-to-peer),
- prywatnej (z zezwoleniem, gdzie łańcuch zapewnia oparty na rolach dostęp do danych i wykorzystuje sieci chmurowe w celu zwiększenia elastyczności),
- konsorcjum (hybrydowa – w takim przypadku sieć pełni funkcje zarówno publicznych, jak i prywatnych blockchainów).

Innowacyjność Technologii Blockchain dotyczy połączenia różnych dziedzin: inżynierii oprogramowania, informatyki rozdzielczej, nauki kryptograficznej oraz ekonomicznej teorii gier. Technologia ta może być rozumiana także jako sekwencja rekordów, z których każdy jest mieszany i powiązany z poprzednim blokiem [65]. Oznacza to, że wszyscy użytkownicy sieci wprowadzają nowe dane i jednocześnie mają dostęp do wcześniej już wprowadzonych przez pozostałych uczestników systemu. Blockchain umożliwia interakcje i transakcje za pośrednictwem Internetu [66].

Technologia Blockchain umożliwia rozproszone, szyfrowane i bezpieczne rejestrowanie przekazów cyfrowych danych. W takim środowisku łańcuch bloków zapewnia godną zaufania infrastrukturę zarządzania informacjami na wszystkich etapach cyklu życia projektu. Stosowanie modelowania nie wyklucza obecności blockchain, gdyż to właśnie cechy tej technologii uzupełniają braki projektowe między innymi w aspekcie wątpliwości prawnych. Dla przykładu w projektach budowlanych blockchain zapewnia chronologiczny i niezmienny zapis autorów poszczególnych zadań, gdyż uwierzytelnianie przesłanych informacji uniemożliwia późniejsze zmiany, stąd każdy z uczestników potwierdza autorstwo wykonanych działań.

Pełna historia danych wraz ze wszystkimi jej modyfikacjami oraz metadanymi (sygnatura czasowa, informacje o autorze) jest zabezpieczona odpowiednikiem kryptograficznie silnego podpisu cyfrowego. Z uwagi na zdecentralizowany charakter struktury sieci eliminuje konieczność centralnego zaufanego organu zewnętrznego. Obie wymienione wyżej właściwości odpowiadają charakterowi procesu projektowania budynku odbywającego się w ramach współpracy peer-to-peer dla sieci firm i osób prywatnych.

12. Informatyzacja projektów i zarządzanie nimi na przykładzie technologii BIM

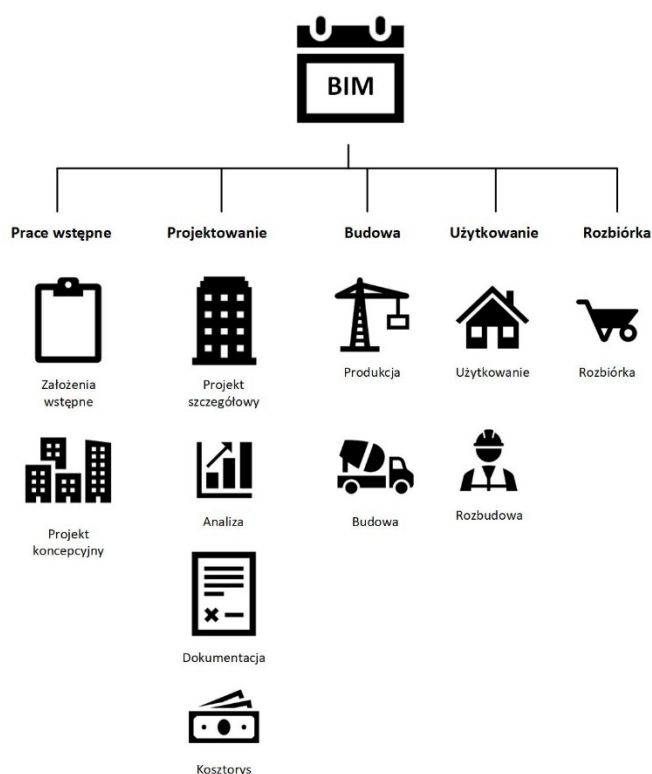
W branży budowlanej informatyzacja procesów upłynnia działanie przedsiębiorstwa oraz umożliwia odczyt informacji niemal natychmiast od ich udostępnienia. Dyscyplina taka wpływa na kolejne etapy projektów i trwające procesy budowlane, co ma w efekcie odzwierciedlenie w postaci zysków czasowych, obniżki kosztów i zoptymalizowanego wykorzystania zasobów. Systemy informatyczne ewoluowały w projektach budowlanych głównie dzięki popularności EDI (ang. *electronic data interchange*), które pozwalają na wymianę danych, na przykład o potrzebach materiałowych. Pełna informatyzacja procesów projektowych dodatkowo umożliwia automatyzację zadań stawianych określonym organizacyjnie działaniom, które powinny być przewidywane z wykorzystaniem systemów predykcyjnych. Dla przedsiębiorstw budowlanych zarządzanie projektem to najważniejszy proces, stąd konieczna jest umiejętność skutecznego kierowania nim [35]. Nowoczesne programy komputerowe wychodzą naprzeciw oczekiwaniom branży. Co ważne, oprogramowanie dla budownictwa stanowią wysoko wyspecjalizowane algorytmy od analizy wytrzymałościowej, poprzez aplikacje do kreślenia instalacji mechanicznych, elektrycznych i wodno-ściekowych, sprawdzania nośności gruntu po moduły służące do analizy statycznej i wymiarowania. Wirtualne aplikacje wspomagane internetowo umożliwiają mapowanie obiektów w czasie rzeczywistym i nakładanie warstw obiektów na rzeczywisty obraz oraz wirtualne przemieszczanie się po symulacji inwestycji [36]. Na budowach coraz częściej dokumentację papierową zastępują tablety, które umożliwiają za pomocą kliknięcia w poszczególne elementy podgląd wszystkich parametrów, wymiarów, rodzajów mocowań, materiałów, symboli części, oznaczenia farb itd.

Bezproblemowe pozyskiwanie oraz przetwarzanie informacji zwiększa elastyczność procesów, a im więcej danych jest dostępnych i archiwizowanych, tym szersze spektrum mogą osiągnąć procesy optymalizacji i doskonalenia zarządzania informacją o projektach. Wymiana danych pomiędzy współpracującymi ze sobą zespołami projektowymi daje możliwość równoległej pracy, co znacznie skraca kolejne etapy realizacji i komunikacji pomiędzy wykonawcami, co z kolei ma decydujący wpływ na końcowy kształt projektów [37]. Zanim skrupulatne tworzenie kompleksowej dokumentacji stało się standardem, prace projektowe, planistyczne i konstrukcyjne organizowano wokół mistrza budowlanego. Współcześnie wszystkie procesy planowania i projektowania wymieniane są pomiędzy wykonawcami cyfrowo w postaci zdigitalizowanej, a coraz większą częścią informacji projektowych zarządza technologia modelowania informacji (BIM – *building information modeling (management)*).

Pojęcie BIM pojawiło się na początku XXI wieku i wywodzi się bezpośrednio od koncepcji modelowania informacji o produkcie (ang. *Product Information Modeling* – PIM), stosowanej w przemyśle od lat 80. XX wieku [38, 39]. Technologię BIM definiuje się na dwa sposoby [40, 41]:

- *building information modeling* – polega na cyfrowej reprezentacji modelu składającego się z elementów sporządzonych przez projektantów (m.in. konstruktorów, architektów, technologów), wykonawców i użytkowników;
- *building information management* – rozumiany jako sposób uporządkowania przepływu informacji o obiekcie na każdym etapie jego cyklu życia, od koncepcji, poprzez projektowanie, budowę, użytkowanie, renowację aż po rozbiórkę.

Schemat obiegu danych w technologii BIM na poszczególnych etapach powstania i użytkowania obiektu budowlanego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat obiegu danych w technologii BIM na poszczególnych etapach powstania i użytkowania obiektu budowlanego (oprac. własne)

Fig. 1. Diagram of data circulation in BIM technology at various stages of creation and use of a building object (developed by own)

Technologia BIM proponuje kompleksowe rozwiązanie z zakresu oprogramowania komputerowego, przydatne do projektowania, wizualizacji, analiz i współpracy, co umożliwia podejmowanie decyzji dotyczących aspektów technicznych i biznesowych. Wykorzystywanie BIM usprawnia codzienną pracę nad materiałem. Praca ta organizuje automatyczne generowanie rysunków, raportów, analiz, harmonogramów i pozostałych niezbędnych informacji o obiekcie. Przez umożliwienie uczestnikom procesu budowlanego efektywnego współdzielenia zadań i informacji o projekcie wspiera rozproszone zespoły projektowe. Źródłem częstych problemów w budownictwie jest oddzielenie od siebie dwóch etapów:

projektowania i realizacji inwestycji. BIM, w odniesieniu do metod konwencjonalnych, oferuje w tym zakresie całkowicie nowe podejście – współpracę pomiędzy inwestorem, projektantem i wykonawcą budowlanym oraz zintegrowanie wszystkich ich funkcji (IPD – *Integrated Project Delivery*). BIM dostarcza również informacje niezbędne dla inwestorów: o opłacalności zamierzenia inwestycyjnego, dla projektantów: o możliwości wirtualnego operowania modelem, umożliwia ponadto łatwość wprowadzania ewentualnych zmian na niemal każdym etapie zaawansowania projektu, elastyczną pracę i dostosowanie się do preferencji inwestora, projektanta czy wykonawcy. W niektórych projektach infrastrukturalnych, takich jak budowa autostrady, przeanalizowanie kilkudziesięciu kilometrów dróg i setek kolizji przy zastosowaniu tradycyjnej metody (czyli na podstawie rysunku dwuwymiarowego) jest zadaniem trudnym i czasochłonnym. Korzystanie ze standardów BIM przyspiesza takie czynności i eliminuje pominięcia kolizji związanych z ukształtowaniem wysokościowym oraz z uwzględnieniem miejsc nietypowych [42].

13. Bariery dla wprowadzenia BIM

Dla niektórych badaczy kwestie prawne są jednymi z podstawowych barier dla wdrożenia technologii BIM [43]. Redmond i in. [44] oraz Thomas [45] za bariery uznali brak jednoznacznego wskazania:

- kto jest właścicielem modelu,
- kto ma prawa do modyfikacji i dystrybucji,
- kto ponosi odpowiedzialność za zmiany lub błędy,
- w jaki sposób zarządzać ochroną praw autorskich,
- jakimi sposobami chronić cyfrową własność intelektualną,
- kto jest właścicielem zbiorów danych i kto je opłaca,
- kto odpowiada za dokładność i poprawność elementów składowych projektu.

Wśród barier dla wdrożenia BIM wyłoniono ponadto [46]:

- niechęć do zmian,
- brak zrozumienia nowoczesnych aplikacji,
- konieczność inwestycji w zespoły pracownicze,
- obawy architektów przed utratą statusu lidera projektów budowlanych,
- konieczność modyfikacji znanych już procesów prowadzenia dokumentacji projektów.

Do niedawna zastosowanie blockchain w budownictwie było ograniczone. Zdarzały się próby wykorzystywania go do przechowywania danych z czujników budynków w sposób godny zaufania i rozproszony, zakończony sukcesem [67]. W swoich publikacjach Barnett zidentyfikował przykłady zastosowania blockchain w branży budowlanej między innymi przy prowadzeniu dokumentacji własności cyfrowej, aktach lub transakcjach oznaczonych znacznikami czasu, transakcjach z wieloma podpisami, inteligentnych umowach, inteligentnych miastach oraz w inwestycjach w nieruchomości [68].

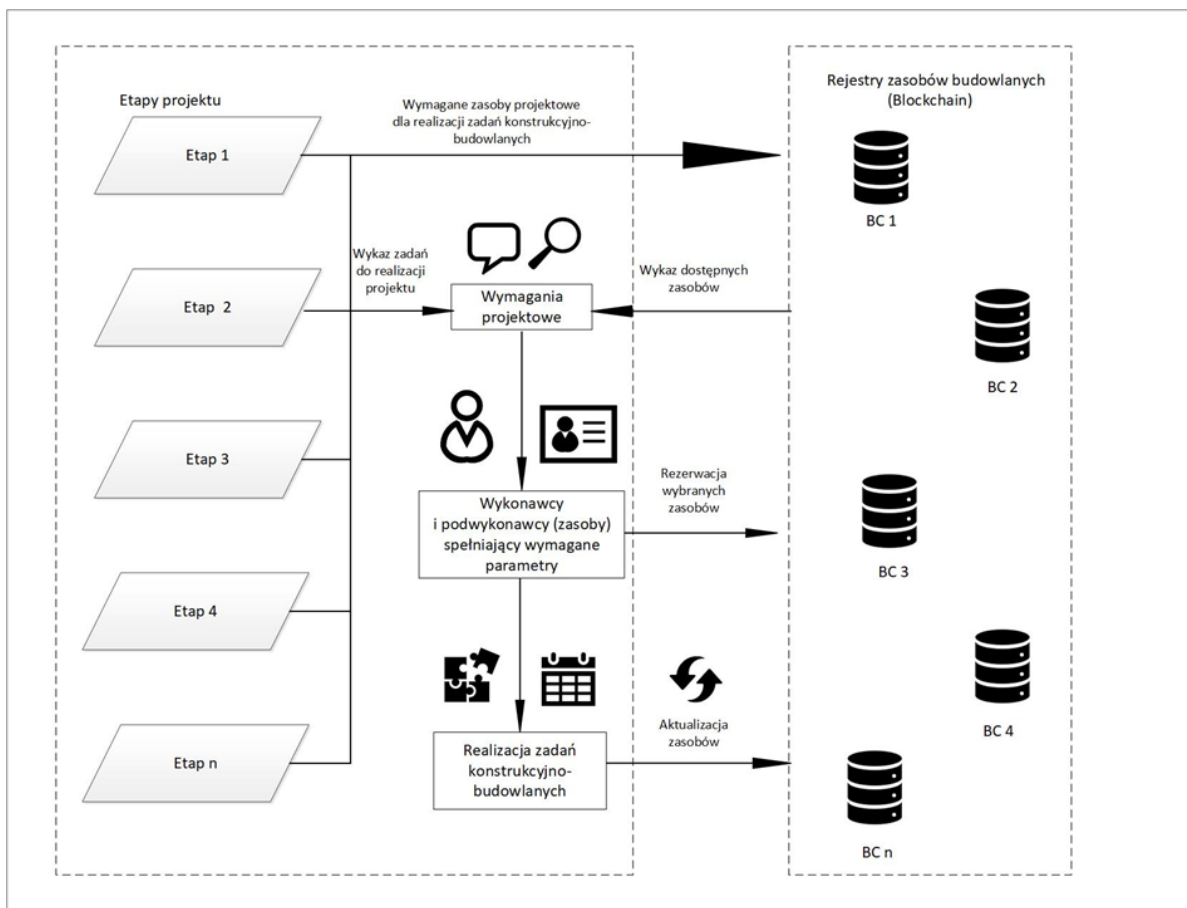
14. Zasadność zastosowania Technologii Blockchain w zarządzaniu projektami budowlanymi

O zasadności wykorzystania rejestrów współdzielonych z innymi wykonawcami i podwykonawcami należy zdecydować, odpowiadając na kluczowe pytania. Ścieżka decyzyjna powinna zawierać odpowiedź na pytania, czy jako kierownicy projektu potrzebujemy:

- dostępu do bazy zawierającej dane o budynkach,
- dostępu do współdzielonych danych projektowych,
- pozyskać podwykonawców lub wykonawców zaufanych i zaakceptowanych przez sieć boków,
- zawrzeć konsensus,
- dokonać transakcji (wymiany danych lub zawarcia umów) w ramach inteligentnych, wirtualnych kontraktów.

Odpowiedź na wszystkie pytania twierdząco powinna stać się przyczynkiem do zastosowania Technologii Blockchain w projekcie.

Na rys. 2 przedstawiono architekturę procesu wymiany danych z zastosowaniem BCT w projektach do rejestrowania informacji o ich przebiegu i poszukiwaniu potrzebnych zasobów.



Rys. 2. Proces wymiany danych z zastosowaniem BCT do rejestrowania informacji o etapach projektu (oprac. własne)

Fig. 2. Data exchange process using BCT to record information about the stages of the project (ed. own)

Przesłankę wdrożenia Technologii Blockchain (BCT) (ang. *Blockchain Technology* – BCT) w obszarze projektowym w budownictwie stanowi problem doboru zasobów do zadań realizowanych przez dane przedsiębiorstwo samodzielnie, z udziałem innych przedsiębiorstw lub konsorcjów w ramach współpracy. Firma odpowiedzialna za projekt, budując listę etapów projektu do realizacji, dobiera niezbędne zasoby wykonawcze – stanowiska, materiały budowlane i inne środki konstrukcyjne, narzędzia i oprzyrządowanie oraz zasoby ludzkie o kompetencjach pozwalających na wykonanie zadań składowych projektu. Dobór zasobów musi spełniać określone wcześniej wymagania. Co ważne, poszukiwane zasoby mogą być w dyspozycji przedsiębiorstwa realizującego zadania projektowe, zewnętrznych firm lub wśród partnerów współpracujących w ramach konsorcjum. W tradycyjnym schemacie postępowania wymagane jest każdorazowe odpytywanie kontrahentów o bieżący stan zasobów. Poziom złożoności praktycznych zadań projektowych niemalże eliminuje procesy manualnej kontroli oraz sprawdzania niezbędnych regulacji prawnych, norm budowlanych, przepisów prawa budowlanego. Przy uwzględnieniu powyższego, zachodzi konieczność stworzenia zaawansowanych algorytmów planowania i kontroli zadań oraz mechanizmów umożliwiających ich zasilenie w aktualne dane. Pomocna w tym przypadku może okazać się Technologia Blockchain. W założeniu przedstawionym w niniejszym przykładzie następuje współdzielony wgląd do wspólnego rejestru danych projektowych, które opierają się na sieci klasy korporacyjnej (rys. 2). W sieci tej poszczególni użytkownicy mają różny dostęp do danych, węzły tworzą bazy wykorzystujące dostępne i udostępniające dane projektowe. Każda dokumentacja powiązana jest z oddzielnym łańcuchem bloków. Dodawanie i odczyt informacji w poszczególnych łańcuchach regulują uprzednio określone uprawnienia użytkowników. Uprawnienia mogą mieć charakter prywatny lub publiczny.

Zastosowanie współdzielonego rejestru danych projektowych w Technologii BC według przyjętego schematu umożliwi:

- szybki dostęp do niezbędnych informacji,
- automatyzację zaliczenia dobrze zrealizowanych etapów projektu,
- zachowanie procedur bezpieczeństwa i poufności danych (w przypadku wykonywania projektu z wieloma podwykonawcami),
- niższe koszty infrastruktury informatycznej,
- oszczędność czasu wynikającego z tradycyjnego obiegu dokumentacji,
- możliwość kooperacji powiązanych przedsiębiorstw w ramach wspólnych projektów budowlanych.

15. Podsumowanie

Podstawowym problemem w doborze właściwego podejścia projektowego jest uwzględnienie specyfiki i założeń planowania oraz możliwości danej organizacji. Wdrożone

systemy zarządzania projektami powinny eliminować zbędne procedury administracyjno-biurowe oraz dodatkowe obciążenia związane z tworzonym systemem komunikacji projektowej. Rosnące wymagania w zakresie efektywności projektów i minimalizacji kosztów ich realizacji wymagają narzucenia dyscypliny czasowej i finansowej, co jest znacznie trudniejsze w wypadku wielu podmiotów odpowiedzialnych za przedsięwzięcie. Blockchain stanowi obecnie obszar intensywnych badań w środowisku przemysłowym. Jego mała popularność w branży projektowej sprawia, że nadal się utożsamiana jest ze środowiskiem transakcji i obiegu wirtualnych walut. Bezpieczeństwo danych, tajemnica realizacji projektów oraz dbałość o wzrost jakości wykonywanych projektów i świadczonych usług w najbliższej przyszłości spowodują przyjęcie na rynku funkcjonowania przedsiębiorstw w BC. Nieunikniona jest bowiem cyfrowa transformacja w zarządzaniu obiegiem dokumentacji i zmiana sposobu tradycyjnego projektowania, obsługiwanie oraz sprzedaży usług na rzecz cyfryzacji. Nie bez znaczenia są również aspekty poprawiające przejrzystość w gospodarowaniu danymi oraz wgląd do etapów procesu wykonawczego na każdym poziomie ich realizacji i kontroli.

Kierunkiem dalszych prac badawczych będzie implementacja zaproponowanej struktury do aplikacji służącej wspomaganie procesów zarządzania projektami i próba wdrożenia jej w czynności związane z zarządzaniem projektami naukowo-badawczymi.

Bibliografia

1. Iwański T., Gracel J., Przemysł 4.0. Rewolucja już tu jest. Co o niej wiesz?, raport opracowany przez ASTOR, 2017.
2. Skrzypek E., Paradygmaty zarządzania wiedzą w warunkach zmian otoczenia. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 419, 2016.
3. Rodney T.J., Müller R., On the nature of the project as a temporary organization, „International Journal of Project Management”, 21/1 (2003), p. 1-8.
4. Seymour T., Hussein S., The History of Project Management, „International Journal of Management & Information Systems”, 18/4 (2013).
5. Frączkowski K., Zarządzanie projektem informatycznym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
6. Troicki M., Bukłaha E. (red.), Zarządzanie projektami – wyzwania i wyniki badań, Oficyna Wydawnicza SGH w Warszawie, Warszawa 2016.
7. Munns A.K., Bjeirmi B.F., The role of project management in achieving project success, „International Journal of Project Management”, 14/2 (1996).
8. Kozarkiewicz A., Zarządzanie portfelami projektów, PWN, Warszawa 2012.
9. Wyrozębski P., Metodyka PMI: Project Management Body of Knowledge, [w:] Metodyki zarządzania projektami, Wyd. Bizarre, Warszawa 2011.

10. Wachowiak P., Gregorczyk S., Grucza B., Ogonek K., Kierowanie zespołem projektowym, Difin, Warszawa 2004.
11. Frame J. D., Zarządzanie projektami w organizacjach, Wyd. WIG- Press, 2001.
12. Highsmith J., Agile Project Management – Jak tworzyć innowacyjne produkty, Wyd. Mikom, Warszawa 2005.
13. Hammer M., Stanton S.: Jak naprawdę funkcjonuje firma zarządzana procesowo? „Harvard Business Review Polska”, 2003.
14. Hammer M., Champy J.: Reengineering w przedsiębiorstwie. Neumann Management Institute, Warszawa 1966.
15. Gajewski P.: Koncepcja struktury organizacji procesowej. Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa „Dom Organizatora”, Toruń 2003.
16. Stadelman M., Lux W., Przegląd popularnych koncepcji zarządzania, Zarządzanie na Świecie, nr 1, 2001.
17. Gajewski J., Paprocki W., Pieriegud J. (red.), Cyfryzacja gospodarki i społeczeństwa – szanse i wyzwania dla sektorów infrastrukturalnych, Instytut Badań nad Gospodarką Rynkową, Gdańska Akademia Bankowa, Gdańsk 2016.
18. Cyfrowa Polska. Szansa na technologiczny skok do globalnej pierwszej ligi gospodarczej, raport opracowany przez McKinsey & Company, Forbes Polska, 2016, <https://www.mckinsey.com/pl/our-insights/cyfrowa-polska>.
19. Tihinen M., Iivari M., Ailisto H., Komi M., Kääriäinen J., Peltomaa I., An exploratory method to clarify business potential in the context of industrial internet – a case study, [in:] Collaboration in a Hyperconnected World, Portugal 2016.
20. Vaidya S., Ambad P., Bhosle S., Industry 4.0 – A Glimpse, “Procedia Manufacturing”, vol. 20, 2018.
21. Müller J.M., Buliga O., Voigt K.I., Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0, „Technological Forecasting and Social Change” 2018, vol. 132.
22. Kusiak A., Smart manufacturing, „International Journal of Production Research”, vol. 56, no. 1-2, 2018.
23. Bowersox D.J., Closs D.J., Drayer R.W., The digital transformation: Technology and beyond, “Supply Chain Management Review” 2005, no. 9(1).
24. Worek B., Stec K., Strzebońska A., Antosz P., Rozwój kompetencji – uczenie się osób dorosłych i podmioty oferujące usługi rozwojowe, raport opracowany przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości, 2018, https://www.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/Rozwoj-kompetencji-uczenie-sie-osob-doroslych_200129.pdf.
25. Moeuf A., Pellerin R., Lamouri S., Tamayo-Giraldo S., Barbaray R., The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0, “International Journal of Production Research”, no. 56(3), 2018.

26. Kamble S.S., Gunasekaran A., Gawankar S., Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives, „Process Safety and Environmental Protection” 2018, no. 117.
27. Wodecka-Hyjek A., *Metodyka PRINCE2 w zarządzaniu realizacją projektów*, [w:] *Nurt metodologiczny w naukach o zarządzaniu. 50 lat pracy naukowej prof. zw. dr hab. Zofii Mikołajczyk*, red. W. Błaszczuk, I. Bednarska-Wnuk, P. Kuźbik, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2010.
28. Koszłajda A., *Zarządzanie projektami IT. Przewodnik po metodykach*, Helion, Gliwice.
29. IPMA, *IPMA Organizational Competence Baseline – The standard for moving organizations forward*, IPMA, Zurich, 2013.
30. Skrzypek E., 2016, *Paradygmaty zarządzania wiedzą w warunkach zmian otoczenia*, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, nr 419.
31. Gudanowska A., Kononiuk A. (red.), *Uwarunkowania ucyfrowienia procesów produkcji i wzrostu kompetencji cyfrowych społeczeństwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2020.
32. Kucińska-Landwójtowicz A., *Uwarunkowania rozwoju koncepcji ciągłego doskonalenia w przedsiębiorstwach produkcyjnych*, IZIP, 2015.
33. *Edukacja. Jest w niej ukryty skarb. Raport dla UNESCO Międzynarodowej Komisji do Spraw Edukacji dla XXI wieku pod przewodnictwem Jacques’a Delors’a*, , Wydawnictwo UNESCO, Warszawa 1998.
34. Gudanowska A., Kononiuk A. (red.), *Uwarunkowania ucyfrowienia procesów produkcji i wzrostu kompetencji cyfrowych społeczeństwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2020.
35. Szymański T.: *Systemy informatyczne wspierające organizacje z sektora budownictwo*. „Zarządzanie i Finanse” 2013, nr 1, z. 4, s. 543-587.
36. Gradziński P.: *Przestrzeń cyfrowa: arealny nowy świat*. „Architecturae et Artibus” 2015, nr 1, s. 25-35.
37. Turk Ž., *Communication Revolutions-How They Changed It All*. In *IKE*, 2010, p. 491.
38. Antal. *Rozwój Building Information modeling w Polsce*, Raport z badania; 2017.
39. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Listo K.: *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. Hoboken (New Jersey): Wiley, 2008.
40. Miettinen R., Paavola S.: *Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling*. *Automation in Construction* 43, 2014.
41. Rawska-Skotniczny A. Margazyn A.: *Rozbiórki budynków i budowli*. WN PWN, Warszawa 2016.
42. Puszko K.: *BIM jako przejaw innowacji logistycznych w budownictwie*. „Autobusy” 2016, nr 6.

43. Eastman C., Eastman C.M., Teicholz P., Sacks R., Liston K., BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons, 2011.
44. Redmond A., Hore A., Alshawi M., West R., Exploring how information exchanges can be enhanced through Cloud BIM. *Automation in Construction*, 24 (2012).
45. Thomas L.W., Legal issues surrounding the use of digital intellectual property on design and construction projects, NCHRP Legal Research Digest Issue Number: 58 (2013), Transportation Research Board.
46. Ustinovicus L., Wierzowiecki P., Puzinas A., Modelowanie informacyjne budowli (BIM) – stan rozwoju i perspektywy wdrażania w Polsce. *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*. Tom I, Opole 2016.
47. Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge, Management Training & Development Center, Warszawa 2017.
48. Kisielnicki J., Zarządzanie projektami badawczo-rozwojowymi, Wolters Kluwer, Warszawa 2013.
49. Griffin R.W., Podstawy zarządzania organizacjami, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
50. Standish Group International, (2007). The Standish Group Report 2007. Massachusetts: West Yarmouth.
51. Kerzner H., *Advanced Project Management*, edycja polska, Helion, Gliwice 2005.
52. Podręcznik Frascati. Proponowane procedury standardowe dla badań statystycznych w zakresie działalności badawczo-rozwojowej, OECD, Paryż 2002, 4.
53. Janasz W., *Innowacyjne strategie rozwoju przemysłu*, Fundacja Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin 1999.
54. Białoń L., Obrębski T., *Elementy polityki przemysłowej*, Politechnika Warszawska, Warszawa 1993, s. 5-86.
55. Mingus N., *Zarządzanie projektami*, One Press, Gliwice 2002.
56. Lock D., *Podstawy zarządzania projektami*, PWE, Warszawa 2009, s. 11-14.
57. Pankowski K., O co tyle hałasu? Czyli pytania o projekt, http://www.4pm.pl/artykul/o_co_tyle_halasu_czyli_pytania_o_projekt-45-316.html
58. Badiru A.B., *STEP Project Management. Guide for Sciences, Engineering and Technology Projects*, CRC Press, London – New York 2009.
59. Krawiec F., *Zarządzanie projektem innowacyjnym produktu i usługi*, Difin, Warszawa 2000.
60. Stoner J.A.F., Wankel C., *Kierowanie*, PWE, Warszawa 1992.
61. Silver M.S. (1991). *Systems That Support Decisions Makers. Description and Analysis*. NY: John Wiley & Sons.
62. Chmielarz W. (2005). *Selected Problems of IT Development*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe WZ UW.

63. Kamiński A., Gałagus M., Blockchain. Kolejny etap cyfrowej rewolucji? Gazeta SGH, Warszawa 2018.
64. Qiao R., Zhu S., Wang Q., Qin J., Optimization of dynamic data traceability mechanism in internet of things based on consortium blockchain. *Int. J. Distrib. Sensor Networks*, 14(12), 1550147718819072, 2018.
65. Sultan i in.; Sultan K., Ruhi U., Lakhani R., Conceptualizing blockchains: characteristics& applications. 11th IADIS International Conference Information Systems, p. 49-57, 2018.
66. Crosby M., Nachiappan, Pattanayak P., Verma S., Kalyanaraman V., Block-Chain Technology. Beyond Bitcoin. Sutardja Center for Entrepreneurship & Technology Technical Report, University of California, Berkeley, p. 6-19, 2015.
67. Graphic. Blockchain Applications For Smart Infrastructure And Construction Blocksense. Bitcointalk.org. Retrieved from <https://goo.gl/KuNZJP> on 8 March 201.
68. Barnett J., Blockchain for BIM. jeremybarnett.co.uk. N.d., Retrieved from <https://goo.gl/0U754U> on 1 Dec. 2016. S. Trofimov, N. Szumilo, T. Wiegmann. Optimal database design for the storage of financial information relating to real estate investments. *Journal of Property Investment & Finance*, 34(5) (2016), 535-546.
69. Pavitt K. et al., *Managing Innovation: Integrating Technological, Market and Organizational Change*, Wiley, Chichester 1998.

NOWOCZESNE ZARZĄDZANIE PROJEKTAMI PRZEMYSŁOWYMI I NAUKOWO-BADAWCZYMI ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH ZARZĄDZANIA

Streszczenie

W publikacji podjęto tematykę nowoczesnego zarządzania projektami. Opisano podstawowe podejścia projektowe, cyfryzację oraz innowacyjne podejście do kierowania projektami ze szczególnym uwzględnieniem branży budowlanej i stosowanej w jej ramach technologii BIM. Ponadto zaproponowano oparte na BCT rozwiązanie przeznaczone do wspomaganie planowania i rozdzielania zadań projektowych. Przedstawiono koncepcyjny projekt oparty na łańcuchu bloków, który zapewnia rzetelną ocenę postępu zadań projektowych, nadzorowania i ich zatwierdzania oraz zwiększa przejrzystość postępu prac i umożliwia współdzielenie informacji o realizowanych działaniach w ramach współpracujących ze sobą firm projektowych.

Słowa kluczowe: zarządzanie projektami, BIM, Technologia Blockchain, nowoczesna produkcja, digitalizacja projektów

**MODERN MANAGEMENT OF INDUSTRIAL
AND SCIENTIFIC-RESEARCH PROJECTS WITH PARTICULAR
EMPHASIS ON INFORMATION TECHNOLOGY MANAGEMENT**

Abstract

The publication deals with the subject of modern project management. The basic design approaches, digitization and innovative approach to project management are described, with particular emphasis on the construction industry and the BIM technology used in it. In addition, a solution based on BCT was proposed, dedicated to supporting the planning and distribution of project tasks. A blockchain-based conceptual design is presented that provides reliable assessment of the progress of design tasks, supervision and approval, and increases the transparency of work progress and enables the sharing of information on ongoing activities within cooperating design companies.

Keywords: project management, BIM, Blockchain Technology, modern production, digitization of project

Katarzyna BALUCH¹, Maciej WOJTASZAK², Katarzyna ŁYCZKOWSKA³

STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI ZŁĄCZY SPAWANYCH LASEROWO ZE STALI DD11 I DD14

1. Wprowadzenie

Felgi specjalnego zastosowania używane są wszędzie tam, gdzie występują bardzo wymagające warunki pracy, a niezawodność produktu musi być na wysokim poziomie. Firma Trelleborg zajmuje się przetwórstwem gumy oraz produkcją wyspecjalizowanych rozwiązań. Tego typu felgi stosowane są między innymi w:

- przemyśle górniczym;
- przemyśle hutniczym (felgi i opony odporne na wysokie temperatury);
- przemyśle rolniczym (felgi i opony do np. kombajnów, traktorów) (rys. 1);
- przemyśle leśnym;
- transporcie materiałów i konstrukcji (felgi i opony do wózków widłowych i urządzeń transportowych).



Rys. 1. a) Felga do pojazdów rolniczych, b) traktor

Fig. 1. a) Rim for agricultural vehicles, b) tractor

Źródło: a) <https://www.trelleborg.com/pl-pl/wheels/produkty-i-rozwiazania/ko%C5%82a-i-felgi/ko%C5%82a-rolnicze-i-lesne/ko%C5%82a-rolnicze-i-lesne/wheels-and-rims>,

b) <https://www.topagrar.pl/articles/ciagniki/czerwone-felgi-zamiast-szarych/>

¹ Katarzyna.baluch@polsl.pl, Szkoła Doktorów, Politechnika Śląska, <https://omega.polsl.pl/info/author/PSL36528f4fbdfa439a8ee37df54abf9fc3/>

² Maciej.Wojtaszak@trelleborg.com

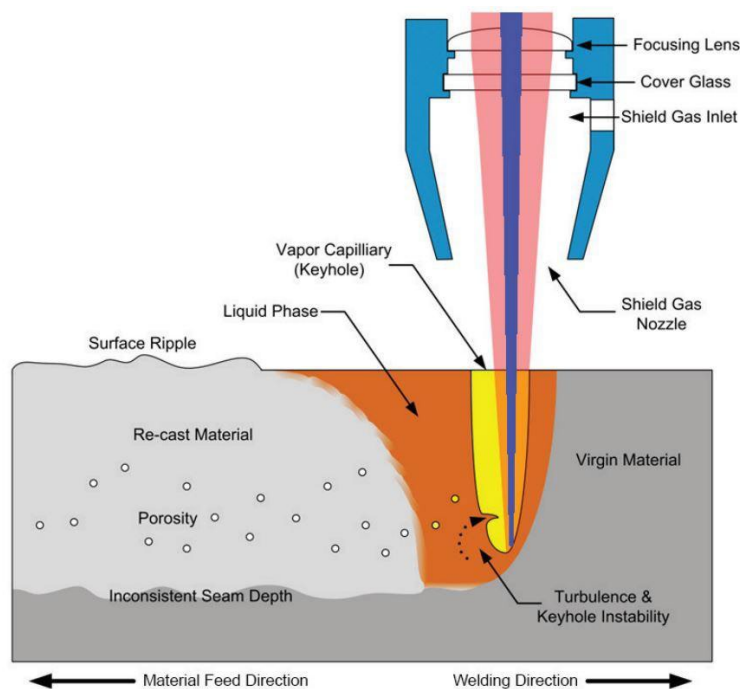
³ Katarzyna.lyczkowska@polsl.pl, Katedra Metalurgii i Recyklingu, Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Śląska, <https://omega.polsl.pl/info/author/PSL667c8f9717254814afc470e1b84f2bcc/>

Ze względu na rozmiary i właściwości użytkowe felgi do zastosowań specjalnych produkowane są głównie ze stali niskowęglowej walcowanej na gorąco przeznaczonej do obróbki plastycznej na zimno. Najczęściej używane są stale z gatunku DD11 i DD14, charakteryzujące się dobrymi właściwościami plastycznymi, a także możliwością łączenia przez zgrzewanie lub spawanie. Dostarczane są one w postaci blach i produktów płaskich o grubości 1,5-8 mm.

Proces produkcji felg specjalnego zastosowania obejmuje dwa główne etapy – produkcję pierścienia felgi i produkcję dysku felgi. Konstrukcja felgi determinowana jest między innymi przez możliwość jej łączenia technikami spawalniczymi, które są wciąż najważniejszymi procesami łączenia konstrukcji stalowych. Na etapie montażu felg elementy łączone są z wykorzystaniem klasycznego procesu spawania 135 (MAG), podczas którego mogą tworzyć się niezgodności spawalnicze takie jak przyklejenia, niewłaściwa geometria spoiny [1]. Wymusza to na etapie produkcji naprawy, które znacznie zwiększają czas produkcji i tym samym koszt wykonania wyrobu [2].

Rynek budowy maszyn jest rynkiem silnie konkurencyjnym [3]. Inwestorzy wymagają wykonania złączy spawanych w krótszym czasie, z wyższą wydajnością i jakością, a także z jak najniższą energochłonnością procesu. Wymusza to na firmach produkujących urządzenia spawalnicze wprowadzania nowoczesnych rozwiązań, takich jak spawanie MAG z podwójnym pulsem, spawanie laserowe, spawanie hybrydowe, które pozwalają na spawanie z wysoką wydajnością i jakością, uzyskiwanie wysokiej powtarzalności produkowanych elementów, a także możliwość automatyzacji i mechanizacji produkcji [2].

Spawanie laserowe, którego schemat przedstawiono na rys. 2, jest procesem spajania przy użyciu skupionej wiązki światła. Ze względu na wysoką precyzję metoda ta wykorzystywana jest w wielu dziedzinach przemysłu. Spawanie laserowe znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie wymagana jest wysoka precyzja połączeń spawanych z zachowaniem wysokiej prędkości łączenia materiałów [4]. Wysoki gradient temperatury w miejscu spawania zapewnia wąską strefę wpływu ciepła, dzięki czemu obszar materiału, w którym mogą pojawić się zmiany strukturalne, jest znacznie ograniczony w porównaniu z metodami spawania łukowego, a wydajność znacznie większa. Spawanie laserowe wykorzystywane jest między innymi w przemyśle motoryzacyjnym, medycznym czy lotniczym. Metodę stosuje się do łączenia stali, aluminium, jak również do tworzenia połączeń miedzianych czy miedź-aluminium oraz połączeń tworzyw sztucznych [5]. Do ochrony jeziora przed utlenianiem w czasie spawania stosuje się gaz osłonowy, którym może być argon lub hel, a zakres grubości materiałów spawanych jednym przejściem mieści się w granicy od setnych części do kilkudziesięciu milimetrów [1].



Rys. 2. Schemat spawania laserem

Fig. 2. Laser welding scheme

Źródło: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/laserwelding/the-evolution-of-laser-welding-technology>

W pracy podjęto próby spawania laserowego w procesie produkcji felg specjalnego zastosowania. Za kryterium dla złączy przyjęto poziom jakości B zgodnie z normą PN-EN ISO 13919-1:2020, co zapewni złącza o poprawnej strukturze oraz o właściwościach mechanicznych i użytkowych zgodnych z wymaganiami, a także zwiększy wydajność procesu.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy była ocena jakości struktury i właściwości mechanicznych złączy wykonanych na blachach o grubości 5 mm ze stali DD11 oraz DD14 spawanych laserowo.

Zakres pracy obejmował:

- wykonanie prób technologicznych spawania,
- ocenę jakości połączeń spawanych w badaniach nieniszczących VT i RT,
- ocenę makro- i mikrostruktury,
- pomiary twardości w złączach spawanych,
- ocenę właściwości mechanicznych, w tym: statyczną próbę rozciągania, próbę zginania i próbę uderzenia,
- analizę wyników,
- wnioski.

3. Materiał do badań

Badania prowadzono na blachach ze stali DD11 i DD14, które są stalami z grupy niskowęglowych walcowanych na gorąco do przeróbki plastycznej na zimno o grubości 5 mm. Skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne materiału do badań zgodne z normą PN-EN10111:2009 wraz z atestem badanego materiału przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Skład chemiczny i właściwości mechaniczne materiału do badań

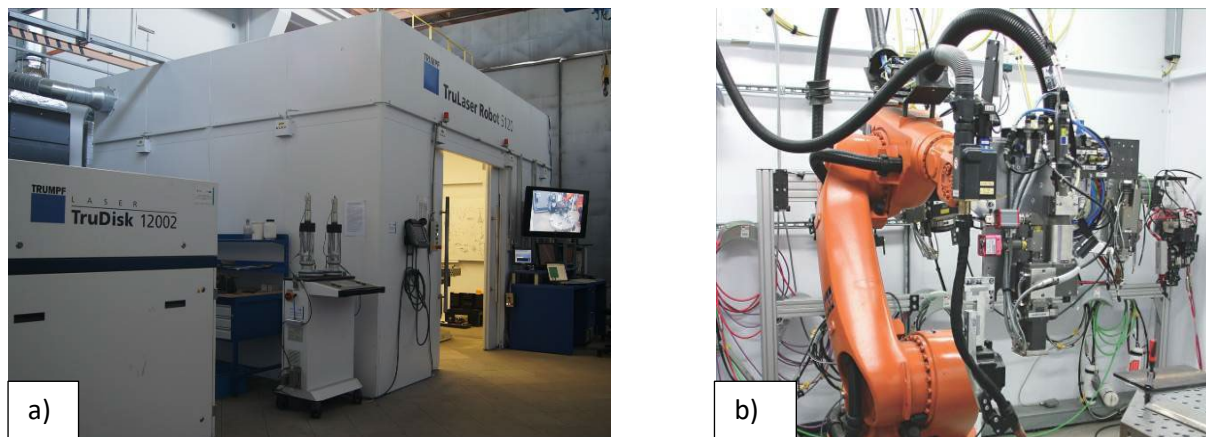
Skład chemiczny [% masowy]							
Materiał	Norma	C	Si	Mn	P	S	Al
	Atest						
DD11	PN-EN 10111	≤ 0,120	-	≤ 0,600	≤ 0,045	≤ 0,045	-
	0001105031146	0,080	0,018	0,500	0,014	0,011	0,043
DD14	PN-EN 10111	≤ 0,080	-	≤ 0,350	≤ 0,025	≤ 0,025	-
	0001104963495	0,033	0,006	0,190	0,012	0,006	0,032
Właściwości mechaniczne							
Materiał	Norma	Re [MPa]		Rm [MPa]		A [%]	
	Atest						
DD11	PN-EN 10111	170 – 340		≤ 440		≥ 28	
	0001105031146	286		399		35,9	
DD14	PN-EN 10111	170 - 290		≤ 380		≥ 36	
	0001104963495	236		315		46,5	

Na podstawie porównania wyników analizy składu chemicznego oraz właściwości mechanicznych próbek stwierdzono, że badane gatunki spełniają wymagania dla stali DD11 i DD14 wg PN-EN 10111.

4. Próby spawania

Próby spawania metodą laserową zostały przeprowadzone w Centrum Spawalnictwa w Sieci Badawczej Łukasiewicz w Górnośląskim Instytucie Technologicznym. Stanowisko spawalnicze wyposażone było w stół uchylno-obrotowy z możliwością pozycjonowania elementów spawanych, 6-osioowy robot przemysłowy o powtarzalności pozycjonowania min. 0,15 mm firmy KUKA KR30HA oraz laser dyskowy firmy Trumpf – TruDisk 12002 wyposażony w system światłowodów o średnicach 200 μm, 300 μm, 400 μm i 600 μm, umożliwiających połączenie rezonatora z głowicą spawalniczą. Blachy ze stali DD11 i DD14 były ukosowane na „I”, bez odstepu. Połączenie rezonatora z głowicą było

realizowane za pomocą światłowodu o średnicy 300 μm . Jako gaz osłonowy użyty został argon o przepływie 16 l/min. Spawanie było prowadzone z mocą lasera 4,5 kW, a prędkość spawania wynosiła 0,8 m/min. Na rys. 3 przedstawiono zdjęcie stanowiska, na którym przeprowadzone były próby spawania.

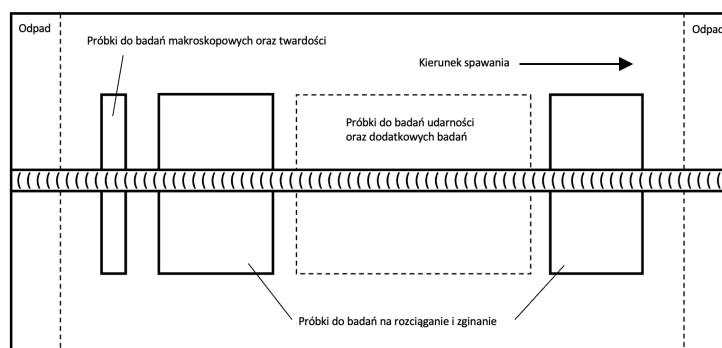


Rys. 3. a) Zrobotyzowane stanowisko do spawania laserowego z laserem dyskowym TruDisk 12002, b) głowica D70 do spawania laserowego i hybrydowego zintegrowana z robotem przemysłowym
 Fig. 3. a) Robotic laser welding station with TruDisk 12002 disk laser, b) D70 laser and hybrid welding head integrated with industrial robot

5. Wyniki badań

Podczas spawania laserowego prowadzony był pomiar cyklu cieplnego spawania. W celu oceny jakości złączy spawanych laserowo ze stali DD11 i DD14 przeprowadzono badania nieniszczące obejmujące badania wizualne i radiograficzne, a także badania niszczące – badania metalograficzne, statyczną próbę rozciągania, próbę zginania, próbę udarności i badania twardości.

Próbki do badań pobrane zostały zgodnie z normą PN-EN ISO 17639-2022-07 (rys. 4).



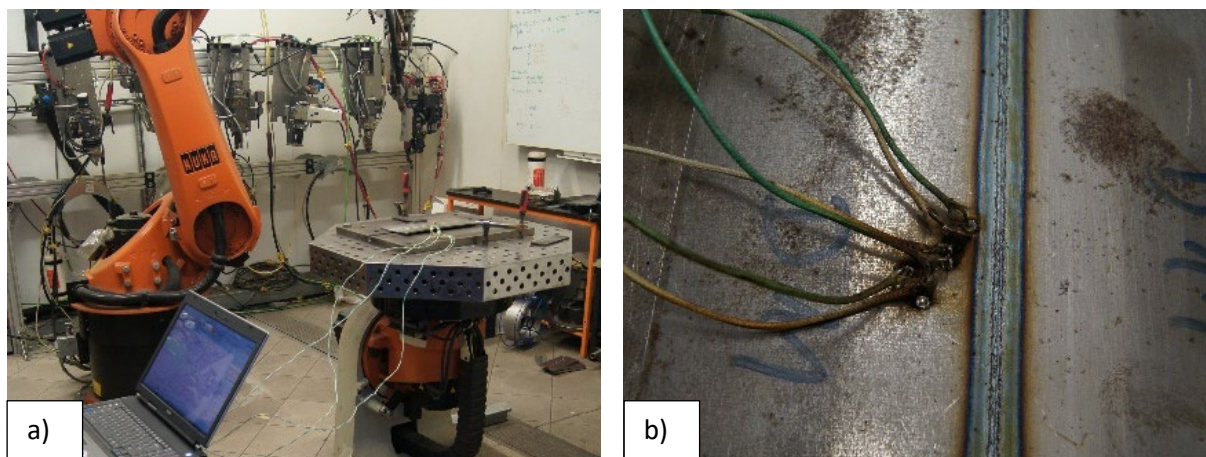
Rys. 4. Miejsce wycięcia próbek do badań metalograficznych i mechanicznych wg normy PN-EN ISO 15614-1:2017

Fig. 4. Place of cutting samples for metallographic and mechanical tests according to PN-EN ISO 15614-1:2017 standard

Źródło: PN-EN ISO 15614-1:2017

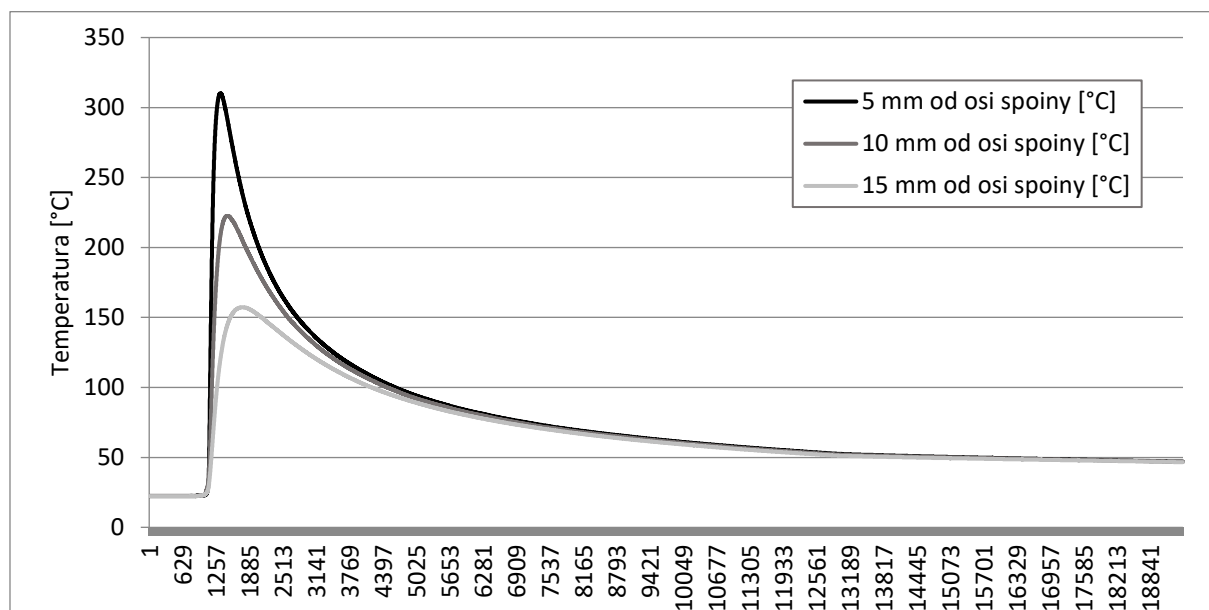
Określenie cyklu cieplnego

Podczas spawania laserem określono zmianę temperatury funkcji czasu w obszarze strefy wpływu ciepła dla próbek ze stali DD11 oraz DD14. Termopary umieszczone były w odległości 5, 10 i 15 mm od spoiny. Zdjęcie stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 5. Wykres cyklu cieplnego spawania został pokazany na rys. 6.



Rys. 5. a) Stanowisko, na którym przeprowadzono badanie cyklu cieplnego spawania, b) przykładowa próbka blachy DD11 z zamocowanymi termoparami

Fig. 5. a) The stand where the welding thermal cycle test was carried out, b) an example of a DD11 sheet sample with thermocouples attached



Rys. 6. Wykres cyklu cieplnego spawania dla próbki DD11

Fig. 6. Welding thermal cycle diagram for specimen DD11

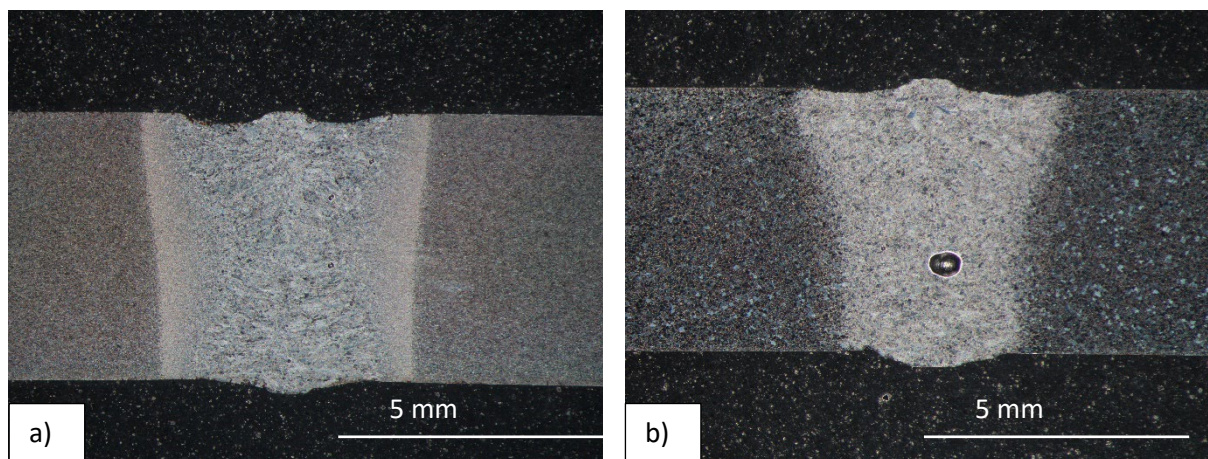
Na podstawie analizy wyników cyklu cieplnego stwierdzono, że obszar znajdujący się w odległości 5 mm od spoiny nagrzewa się do temperatury maksymalnej wynoszącej około 310°C, natomiast dla odległości 10 mm i 15 mm temperatury te wynoszą odpowiednio 220°C i 155°C. Takie temperatury zapewniają stabilną strukturę materiału.

Ocena jakości połączeń spawanych w badaniach nieniszczących

Przeprowadzono badania wizualne VT (visual testing) zgodnie z normą PN-EN ISO 17637 oraz badania radiograficzne RT (radiographis testing) zgodnie z normą PN-EN ISO 17636-1:2013. Podczas badań ujawniono niezgodności takie jak niepełne wypełnienie rowka (wklęsnięcie lica), podtopienie grani i pęcherze gazowe w próbce ze stali zarówno DD11, jak i DD14. Analiza wyników wykazała, że złącza nie spełniają wymagań poziomu jakości B zgodnie z normą PN-EN ISO 13919-1:2020 dla spawania metodą laserową.

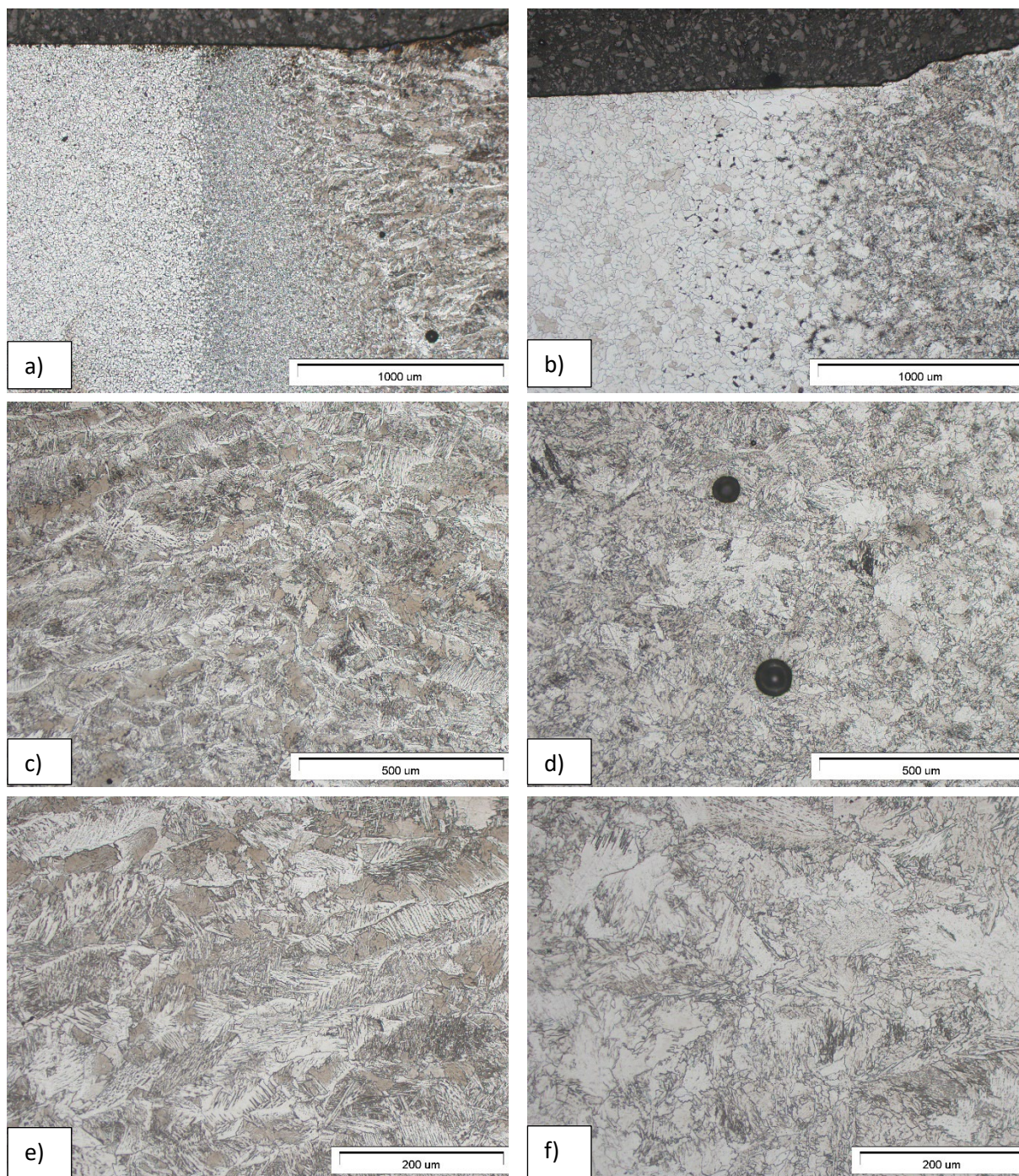
Ocena struktury złączy spawanych

Próbki do badań metalograficznych zostały wyszlifowane, a następnie wytrawione w 5-procentowym roztworze nitalu. Badania makroskopowe i mikroskopowe zostały przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN ISO 17639-07:2022. Zdjęcia makrostruktury zostały zarejestrowane na mikroskopie stereoskopowym Olympus SZX9 (rys. 7), natomiast badania mikroskopowe przeprowadzono na mikroskopie Olympus GX71 (rys. 8).



Rys. 7. Makrostruktura złącza spawanego: a) DD11, b) DD12

Fig. 7. Macrostructure of welded joint: a) DD11, b) DD12



Rys. 8. Mikrostruktura próbek: a) obszar materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła i spoiny próbki DD11, b) obszar materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła i spoiny próbki DD14, c) obszar spoiny próbki DD11, d) obszar spoiny próbki DD14, e) obszar spoiny próbki DD11, f) obszar spoiny próbki DD14

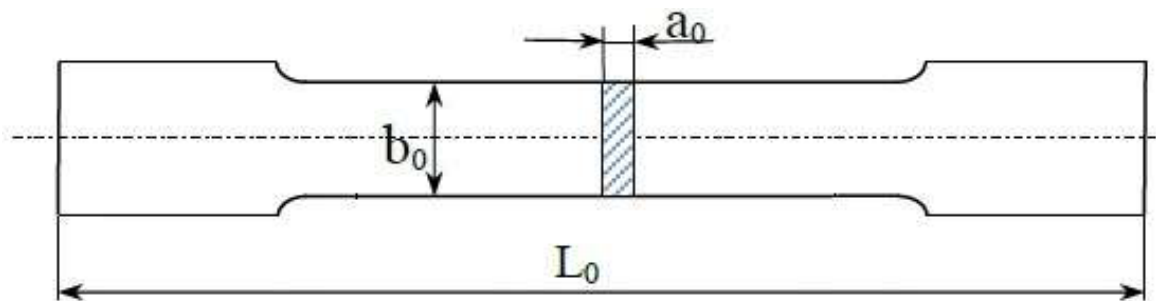
Fig. 8. Microstructure of specimens: a) area of native material, heat affected zone and weld of specimen DD11, b) area of native material, heat affected zone and weld of specimen DD14, c) weld area of specimen DD11, d) weld area of specimen DD14, e) weld area of specimen DD11, f) weld area of specimen DD14

Podczas oceny wewnętrznej złącza prowadzono obserwacje zarówno materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła, jak i spoiny. Na zdjęciach makro- i mikroskopowych (rys. 7, rys. 8) w obu próbkach ujawniono występowanie pęcherzy gazowych. Spawany materiał to stal

o strukturze ferrytyczno-perlitycznej. Strefa wpływu ciepła jest wąska, poniżej 1 mm. Na rys. 8a) i b) można zaobserwować, typowe dla strefy wpływu ciepła, przegrzane struktury ferrytyczno-perlityczne. Struktura spoiny (rys. 8c)–f)) charakteryzuje się układem dendrytycznym z ferrytem gruboziarnistym i ferrytem drobnoziarnistym z perlitem. Na linii wtopienia narastają kryształy struktury pierwotnej spoiny. Kryształy te narastają prostopadle do linii wtopienia i równoległe do kierunku odprowadzania ciepła i łączą się w osi spoiny. W wyniku chłodzenia następują przemiany strukturalne typowe dla spawanych materiałów.

Statyczna próba rozciągania

Statyczna próba rozciągania została przeprowadzona zgodnie z normą PN-EN ISO 4136:2013-05 na maszynie wytrzymałościowej QC501A2 w temperaturze 20°C. Podczas badania wyznaczono wytrzymałość na rozciąganie R_m . Schemat próbki przedstawiono na rys. 9. W tabeli 2 przedstawiono wyniki statycznej próby rozciągania.



Rys. 9. Schemat próbki do próby statycznego rozciągania poprzecznego złącza spawanego, gdzie a_0 [mm] jest określona jako grubość próbki, b_0 [mm] to szerokość części bocznej próbki płaskiej, a L_0 [mm] to całkowita długość próbki

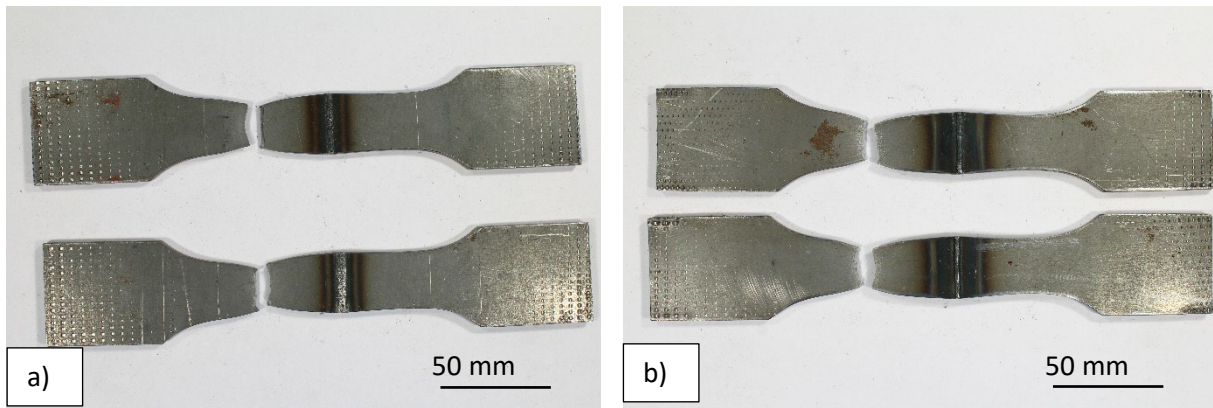
Fig. 9. Diagram of the specimen for the static transverse tension test of a welded joint, where a_0 [mm] is defined as the thickness of the sample, b_0 [mm] is the width of the side part of the flat sample, and L_0 [mm] is the total length of the sample

Źródło: PN-EN ISO 4136:2013-05

Tabela 2

Wyniki badań dla statycznej próby rozciągania złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14

Materiał	Wymiary		Rozciąganie	
	$t_s \times b_0$	S_0	F _m (kN)	R _m (MPa)
	(mm)	(mm ²)		
DD11	5,05 x 25,2	127,26	50	396
DD11	5,05 x 25,2	127,26	50	397
DD14	5,04 x 25,5	128,52	38	300
DD14	5,08 x 25,3	128,52	39	304



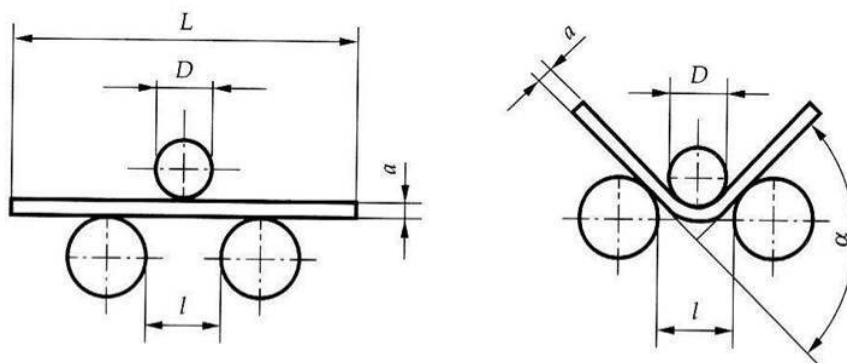
Rys. 10. Próbkki po statycznej próbie rozciągania: a) DD11, b) DD14

Fig. 10. Samples after static tensile test: a) DD11, b) DD14

Wytrzymałość na rozciąganie dla próbek ze stali DD11 to odpowiednio 396 i 397 MPa, natomiast dla próbek ze stali DD14 300 i 304 MPa. Wszystkie wartości spełniają wymagania normy PN-EN 10111, która określa maksymalną wytrzymałość na rozciąganie dla stali DD11 o wartości 440 MPa, a dla stali DD14 380 MPa. Zerwanie wszystkich próbek nastąpiło w materiale rodzimym (rys. 10), co pozwala na stwierdzenie, że obszar spoiny jest bardziej wytrzymały od materiału rodzimego.

Próba zginania

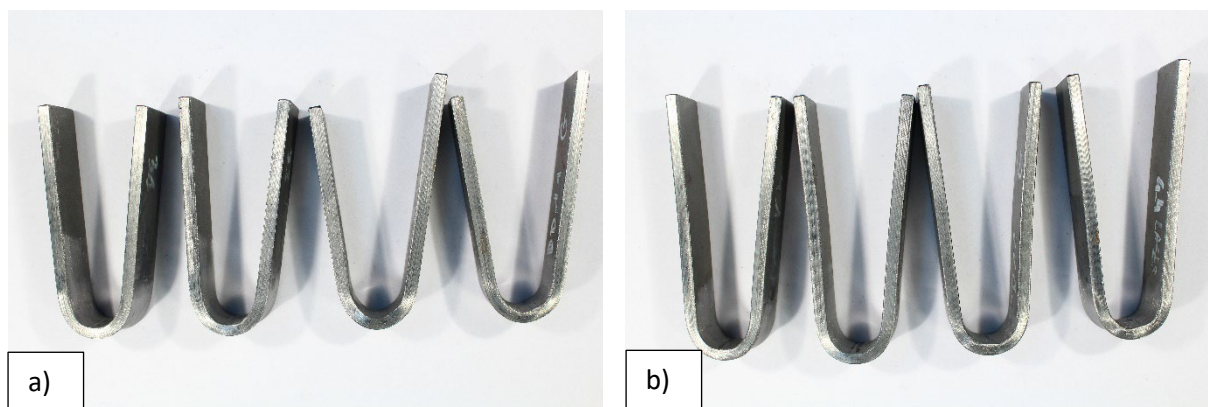
W celu sprawdzenia plastyczności złączy oraz określenia ich odporności na zginanie przeprowadzono próbę zginania z kątem gięcia 180° , zgodnie z normą PN-EN ISO 5173:2010/A1:2012E na maszynie QC-501A2. Wymiary próbek wynosiły $5,0 \times 20,0$ mm, a średnica trzpienia gnącego 20 mm. Badanie prowadzono w temperaturze 20°C . Do badania zostały pobrane po dwa zestawy próbek, po dwie próbki w każdym zestawie. Pierwszy zginano z rozciąganiem od strony lica, natomiast drugi z rozciąganiem od strony grani. Rysunek 11 przedstawia schemat zginania poprzecznego złącza spawanego.



Rys. 11. Schemat próby zginania próbki, gdzie: L – długość całkowita próbki, D – średnica trzpienia, l – odległość pomiędzy podporami, a – grubość próbki, α – kąt gięcia

Fig. 11. Diagram of the bending test, where: L – total length of the sample, D – diameter of the mandrel, l – distance between the supports, a – thickness of the sample, α – bending angle

Źródło: PN-EN ISO 5173:2010/A1:2012E



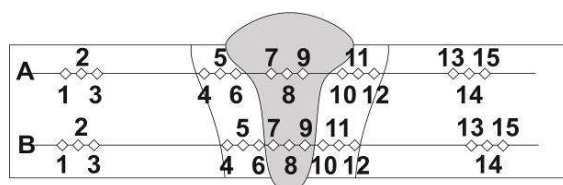
Rys. 12. Próbki po próbie zginania: a) DD11, b) DD14

Fig. 12. Samples after bending test: a) DD11, b) DD14

Po oględzinach powierzchni próbek po próbie zginania poprzecznego z rozciąganiem od strony lica i po próbie zginania poprzecznego z rozciąganiem od strony grani nie ujawniono śladów pęknięć w żadnej z badanych próbek (rys. 12). Złącze spełnia wymagania normy PN-EN ISO 13919-1:2020.

Badanie twardości

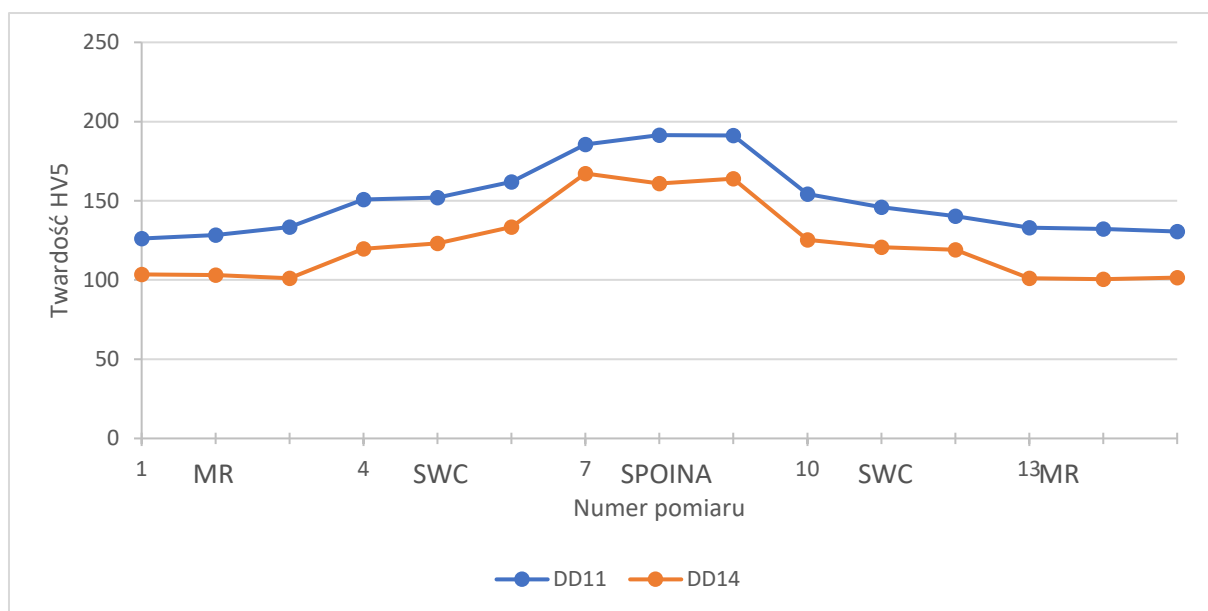
Badanie twardości zostało przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN ISO 9015-2:2016-04 przy obciążeniu HV5 na twardościomierzu Falcon 450G2. Pomiary twardości metodą Vickersa zostały wykonane na wytrawionym zgładzie metalograficznym na przekroju poprzecznym złącza wzdłuż dwóch linii pomiarowych oddalonych o 2 mm od krawędzi próbek. Zostały wykonane po 3 odciski w materiale rodzimym, strefie wpływu ciepła i obszarze spoiny (rys. 13). Uśrednione wartości twardości z obu linii pomiarowych dla próbki ze stali DD11 i DD14 zostały przedstawione na rys. 14.



Rys. 13. Schemat rozmieszczenia punktów pomiaru twardości dla badanych złączy

Fig. 13. Schematic of the arrangement of hardness measurement points for the tested joints

Źródło: PN-EN ISO 9015-2:2016-04



Rys. 14. Wykres twardości próbek ze stali DD11 i DD14 w skali HV5

Fig. 14. Hardness graph of sample DD11 DD14, HV5 scale

Badania twardości mierzonej w skali HV5 wykazały, że twardość materiału rodzimego dla stali DD11 wynosi około 130 HV5, strefy wpływu ciepła około 150 HV5, natomiast spoiny około 190 HV5. W przypadku próbki ze stali DD14 wartości te odpowiednio wynoszą 100 HV5, 125 HV5, 165 HV5. Dla każdego z badanych obszarów twardość w próbce DD11 jest o około 30% wyższa niż dla próbki DD14. Nie stwierdzono twardości powyżej 380 HV oraz znaczącej (>100 HV) różnicy twardości pomiędzy strefami.

Próba udarności

Próba udarności została przeprowadzona zgodnie z normą PN-EN ISO 148-1:2017-02 na próbkach o pomniejszonym przekroju o wymiarach 2,5 x 8,0 x 55,0 mm z karbem V o głębokości 2 mm. Karby nacięto w materiale rodzimym, strefie wpływu ciepła i spoinie. Próby udarności przeprowadzono w temperaturze 20°C oraz -40°C. Pracę łamania wyznaczono za pomocą młota udarnościowego Charpy'ego typu RKP 450 firmy ZWICK o energii początkowej równej 15 J. Na podstawie równania 1 obliczono wartość udarności dla każdej próbki. Zestawienie wyników próby udarności przedstawiono w tabeli 3.

$$KC = \frac{K}{S_0} \left[\frac{J}{cm^2} \right] \quad (1)$$

gdzie:

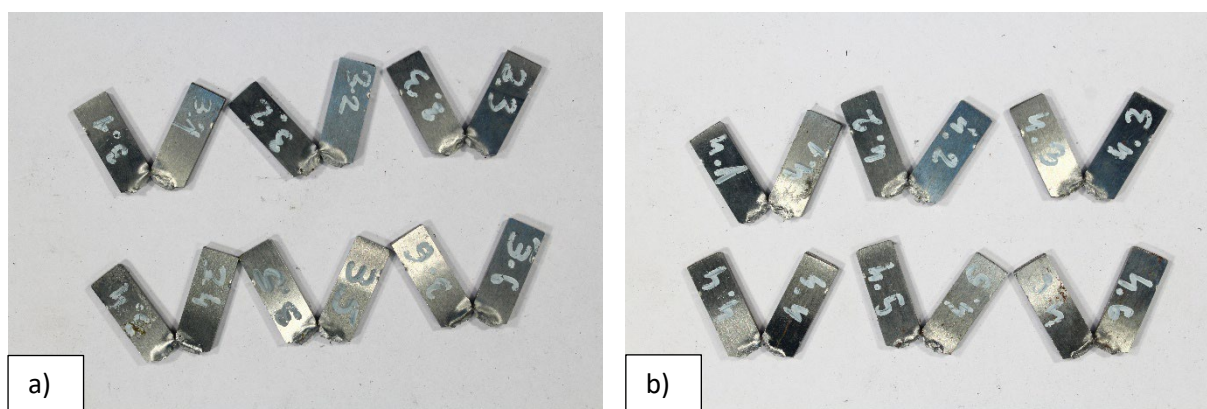
KC – udarność,

S_0 – pole powierzchni początkowej przekroju poprzecznego próbki w miejscu karbu [cm^2],

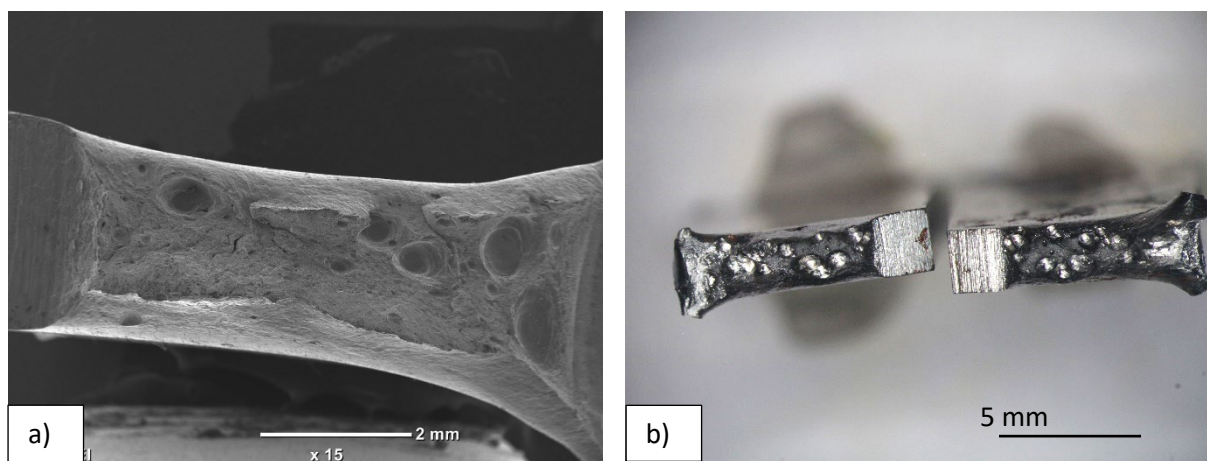
K – praca uderzenia [J].

Wyniki badań dla próby udarności złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14

Materiał próbki	Wymiary		Temp. próby	Średnia praca łamania	Średnia udarność
	$b_0 \times h_0$	S_0			
	(mm)	(mm ²)	t (°C)	K (J)	KC (J/cm ²)
DD11	2,5 x 8,0	20	20	30	150
DD11	2,5 x 8,0	20	-40	31	155
DD14	2,5 x 8,0	20	20	32	160
DD14	2,5 x 8,0	20	-40	25	125



Rys. 15. Próbkki po próbie udarności: a) DD11, b) DD14
 Fig. 15. Samples after impact test: a) DD11, b) DD14



Rys. 16. Przełom próbki po próbie udarności: a) DD11 (SEM), b) DD14 (mikroskop stereoskopowy)
 Fig. 16. Fracture of the sample after the impact test: a) DD11 (SEM), b) DD14

Średnie wartości pracy łamania dla próbek ze stali DD11 wynoszą 30 J dla temperatury 20°C i 31 J dla temperatury -40°C. Dla próbek DD14 wartości te wynoszą odpowiednio 32 J i 25 J.

Średnie wartości udarności dla próbek ze stali DD11 wynoszą 150 J/cm² dla temperatury 20°C i 155 J/cm² dla temperatury -40°C. Dla próbek DD14 wartości te wynoszą odpowiednio 160 J/cm² i 125 J/cm².

Badania fraktograficzne ujawniły przełomy plastyczne z licznymi pęcherzami gazowymi, które można zaobserwować na rys. 16.

6. Podsumowanie wyników

Spawanie laserowe jest procesem wysokowydajnym i pozwala na zwiększenie wydajności spawania. W trakcie badań porównano strukturę i właściwości złączy spawanych doczołowo, ukosowanych na „I” bez odstępów ze stali DD11 i DD14 o grubości 5 mm. Próby spawania były prowadzone z mocą lasera równą 4,5 kW, a prędkość spawania wynosiła 0,8 m/min.

Na zdjęciach makro- i mikroskopowych w obu próbkach ujawniono występowanie pęcherzy gazowych. Materiał rodzimy charakteryzuje się strukturą ferrytyczno-perlityczną, a w wąskiej strefie wpływu ciepła (<1 mm) można zaobserwować, typową dla tego obszaru, przegrzaną strukturę ferrytyczno-perlityczną. Obszar spoiny jest układem dendrytycznym z ferrytem gruboziarnistym i ferrytem drobnoziarnistym z perlitem. Prostopadle do linii wtopienia narastają kryształy struktury pierwotnej spoiny i łączą się one w osi spoiny.

Wytrzymałość na rozciąganie dla złączy spawanych ze stali DD11 i DD14 wynosi odpowiednio 397 i 302 MPa i spełniają wymagania normy PN-EN10111. Nie zaobserwowano pęknięć na próbkach po zginaniu. Wyniki twardości w spoinach wynoszą średnio 150 i 165 w skali HV5 i są o około 30% wyższe w próbce DD14 niż w próbce DD11. Nie zaobserwowano znaczących (>100 HV) różnic w twardości poszczególnych stref ani twardości powyżej 380 HV.

Liczne pęcherze zaobserwowane na zglądach metalograficznych oraz na przełomach po próbie udarności powstają z powodu niewystarczającego czasu na odgazowanie spoiny. Pęcherze gazowe są przyczyną powstawania pęknięć zmęczeniowych w trakcie eksploatacji felg specjalnego zastosowania.

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że próbki ze stali DD11 i DD14 spawane laserowo nie spełniają poziomu jakości B zgodnego z normą PN-EN ISO 13919-1:2020 ze względu na obecność pęcherzy i zaniżenie lica spoiny. Technologia ta nie powinna być stosowana do produkcji felg specjalnego zastosowania.

7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy ich wyników sformułowano następujące wnioski:

- zastosowanie spawania laserowego do złączy z blach ze stali DD11 i DD14 umożliwia wykonanie złącza o wąskiej strefie wpływu ciepła (<1 mm) i właściwościach mechanicznych spełniających wymagania normy PN-EN ISO 13919-1:2020;

- wytrzymałość złączy ze stali DD11 i DD14 wynosi odpowiednio 397 i 302 MPa, twardość w spoinie 150 i 165 HV5 i jest wyższa o około 60 HV5 niż materiału rodzimego, po zginaniu z kątem 180° nie ujawniono śladów pęknięć na próbkach;
- materiałem do badań była stal o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, powstała spoina charakteryzuje się układem dendrytycznym z ferrytem gruboziarnistym i ferrytem drobnoziarnistym z perlitem, układ dendrytyczny jest charakterystycznym dla szybkiego odprowadzania ciepła podczas chłodzenia złącza;
- ze względu na ujawnione niezgodności spawalnicze, trudne do wyeliminowania przez konieczność zwiększenia wydajności spawania, takie jak zaniżenie lica oraz pęcherze gazowe, które są przyczyną pęknięcia zmęczeniowego podczas eksploatacji felgi, złącza spawane nie spełniają poziomu jakości B zgodnie z normą PN-EN ISO 13919-1:2020;
- na podstawie przeprowadzonej analizy badań nie zaleca się stosowania technologii spawania laserowego do łączenia elementów felg specjalnego przeznaczenia.

Bibliografia

1. Pilarczyk J. (praca zbiorowa), Poradnik inżyniera. Spawalnictwo, tom 2. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
2. Ferenc K., Spawalnictwo. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
3. Welding Market Size, Share | Global Industry Growth, 2021-2028, <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/welding-market-101657> [dostęp: 3.04.2023 r.].
4. Spawanie laserowe: Procesy, zastosowania i zalety | KUKA AG, <https://www.kuka.com/pl-pl/produkty-i-uslugi/technologie-procesow/spawanie-laserowe> [dostęp: 30.03.2023 r.].
5. Adamiec J., Technologie wytwarzania rur ożebrowanych stosowanych w energetyce, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2017.

STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI ZŁĄCZY SPAWANYCH LASEROWO ZE STALI DD11 I DD14

Streszczenie

Felgi specjalnego zastosowania używane są m.in. w przemyśle górniczym, hutniczym, rolniczym czy leśnym i muszą zapewniać niezawodność w wymagających warunkach pracy. Tego typu elementy produkowane są głównie ze stali niskowęglowej walcowanej na gorąco przeznaczonej do obróbki plastycznej na zimno z gatunków DD11 i DD14. Podczas produkcji kołnierz i dysk felgi łączone są ze sobą z wykorzystaniem klasycznego procesu spawania

135 (MAG), jednak istnieje konieczność opracowania wysokowydajnego procesu, który pozwoli na skrócenie czasu na wykonanie złącza i zapewni poprawność struktury i właściwości mechaniczne zgodne z wymaganiami. W pracy podjęto próbę opracowania technologii spawania laserem blach ukosowanych na „I” bez odstępu o grubości 5 mm ze stali DD11 i DD14. Analiza wyników pozwoliła na stwierdzenie, że złącza spełniają wymagania mechaniczne, jednak występujące liczne pęcherze gazowe w obrębie spoiny i zaniżenie lica spoiny nie pozwalają na stosowanie metody spawania laserowego do produkcji felg specjalnego przeznaczenia na skalę przemysłową. Obecność pęcherzy gazowych powoduje pęknięcia zmęczeniowe w czasie eksploatacji felgi specjalnego zastosowania.

Słowa kluczowe: spawanie laserowe, felgi zastosowania specjalnego, pęcherze gazowe

STRUCTURE AND PROPERTIES OF LASER-WELDED JOINTS OF DD11 AND DD14 STEELS

Abstract

Special-purpose wheels are used in the mining, metallurgical, agricultural or forestry industries, among others, and must ensure reliability under demanding operating conditions. Such components are produced from hot-rolled low-carbon steel for cold forming of DD11 and DD14 grades. During production, the flange and disc of the rim are joined together using the classic 135 (MAG) welding process, but there is a need to develop a high-performance process that will reduce the time to make the joint and ensure the correctness of the structure and mechanical properties in accordance with the requirements. In this study, an attempt was made to develop laser welding technology for "I" beveled plates without a gap of 5 mm in DD11 and DD14 steels. The analysis of the results led to the conclusion that the joints meet the mechanical requirements, but the presence of numerous gas bubbles within the weld and the undercutting of the weld face do not allow the use of the laser welding method for the production of special-purpose rims on an industrial scale. The presence of gas bubbles causes fatigue cracking during the life of the special-purpose rim.

Keywords: laser welding, special application rims, gas bubbles

Oliwia BASZCZEŃSKA¹, Kamil NIESPOREK²

WPLYW ZASTOSOWANIA IDEI SZEWALSKIEGO NA WZROST SPRAWNOŚCI TURBINY GAZOWEJ

1. Wprowadzenie

Wyczerpywanie się tradycyjnych źródeł energii oraz nakładanie coraz to bardziej rygorystycznych ograniczeń środowiskowych wymusza szukanie technologii, które będą w stanie ograniczyć emisję szkodliwych substancji do otoczenia oraz pozwolą na efektywne i wysokosprawne wytwarzanie energii elektrycznej. Jednymi z najszybciej rozwijających się układów na przestrzeni kilkudziesięciu lat są układy z turbinami gazowymi, a ich szybki postęp technologiczny pozwala na stosowanie coraz to wyższych temperatur spalin na wlocie do ekspandera i uzyskiwanie coraz to większych mocy jednostkowych [1]. Ze względu na szybki rozruch układy te bardzo dobrze współpracują z niestabilnymi źródłami OZE.

Turbina gazowa to silnik cieplny, wykorzystujący energię spalin do wytworzenia mocy mechanicznej, która może być przekształcona w generatorze na energię elektryczną. Najprostszy układ z turbiną gazową składa się ze sprężarki, komory spalania i turbiny gazowej. Największym ograniczeniem co do stosowania wysokich temperatur spalin na wlocie do ekspandera turbiny gazowej jest wytrzymałość materiału, z którego wykonane są łopatki turbiny. Łopatki odpowiadają za wprowadzanie wirnika w ruch obrotowy, który pozwala zmienić energię kinetyczną płynącego czynnika w energię mechaniczną. Wytwarzanie łopatek wymaga zastosowania zaawansowanych technologii metalurgicznych, które pozwolą na poprawienie ich własności żaroodpornych [2].

Dodatkowo w układach z turbinami gazowymi stosuje się chłodzenie łopatek w celu wprowadzenia do turbiny spalin o wyższej temperaturze. Chłodzenie powoduje obniżenie sprawności układu, dlatego należy wcześniej odpowiednio zaprojektować cały proces, aby straty sprawności były jak najmniejsze [3].

¹ Oliwia.Baszczenska@polsl.pl, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, <http://www.polsl.pl/>

² Kamil.Niesporek@polsl.pl, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, <http://www.polsl.pl/>

Istnieje kilka metod pozwalających na poprawę sprawności w układzie z turbiną gazową. Jedną z nich jest zabudowa dodatkowego wymiennika ciepła przed komorą spalania i wykorzystanie spalin wylotowych z turbiny gazowej o wysokiej temperaturze do podgrzewu powietrza przed wlotem do niej. W takiej regeneracji ciepła dąży się do tego, aby temperatura powietrza na wlocie do komory spalania była jak najbardziej zbliżona do temperatury spalin wylotowych, a temperatura wylotowa za wymiennikiem regeneracyjnym była najbliższa temperaturze powietrza wlotowego do sprężarki [4, 5, 6]. Drugą ze stosowanych metod może być wbudowanie wtrysku pary do komory spalania. Spaliny wylotowe o dostatecznie wysokiej temperaturze wykorzystuje się do podgrzania wody w kotle odzyskowym, a powstała para wtryskiwana jest do komory spalania, gdzie miesza się ze sprężonym powietrzem lub z gorącymi spalinami, co zwiększa strumień przepływający przez turbinę, a tym samym generowaną moc elektryczną [7].

2. Metodyka obliczeń

W celu oceny pracy układu gazowego został wyznaczony szereg równań i parametrów zgodnie z przyjętą poniżej metodologią.

Sprawność elektryczna turbiny gazowej $\eta_{el.TG}$ jest to stosunek mocy elektrycznej turbiny gazowej $N_{el.TG}$ do strumienia energii chemicznej paliwa $\dot{E}_{ch.pal}$:

$$\eta_{el.TG} = \frac{N_{el.TG}}{\dot{E}_{ch.pal}} \quad (1)$$

Strumień energii chemicznej paliwa dostarczanego do komory spalania to iloczyn strumienia paliwa spalanego \dot{m}_{pal} oraz jego wartości opałowej Wd :

$$\dot{E}_{ch.pal} = \dot{m}_{pal} \cdot Wd \quad (2)$$

Wskaźnik strumienia energii spalin opuszczających turbinę α jest to stosunek strumienia ciepła spalin opuszczającego turbinę gazową \dot{Q}_{4a} do mocy elektrycznej turbiny gazowej $N_{el.TG}$:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_{4a}}{N_{el.TG}} \quad (3)$$

Strumień ciepła spalin opuszczających turbinę gazową \dot{Q}_{4a} zastosowany w równaniu (3) definiuje się jako iloczyn entalpii spalin oraz ich strumienia masowego na wylocie z turbiny gazowej:

$$\dot{Q}_{4a} = \dot{m}_{4a} \cdot h_{4a} \quad (4)$$

Sprawność termiczna turbiny gazowej $\eta_{t,TG}$ jest to stosunek mocy wewnętrznej turbiny gazowej $N_{i,TG}$ do strumienia ciepła doprowadzonego do turbiny gazowej \dot{Q}_{TG} :

$$\eta_{t,TG} = \frac{N_{i,TG}}{\dot{Q}_{TG}} \quad (5)$$

Znając potrzebne parametry, obliczono strumień ciepła doprowadzonego do obiegu turbiny \dot{Q}_{TG} , który został przedstawiony poniżej:

$$\dot{Q}_{TG} = (h_{3a} \cdot \dot{m}_{3a}) - (h_{2a} \cdot \dot{m}_{2a}) \quad (6)$$

gdzie:

h_{2a} - entalpia czynnika przed komorą spalania,

\dot{m}_{2a} - strumień masowy czynnika przed komorą spalania,

h_{3a} - entalpia czynnika za komorą spalania,

\dot{m}_{3a} - strumień masowy czynnika za komorą spalania.

Wskaźnik chłodzenia γ_{ch} jest stosunkiem strumienia chłodzącego \dot{m}_{1c} do strumienia masowego powietrza na wlocie do turbiny gazowej \dot{m}_{1a} :

$$\gamma_{ch} = \frac{\dot{m}_{1c}}{\dot{m}_{1a}} \quad (7)$$

Została również policzona emisja dwutlenku węgla do otoczenia E_{CO_2} i definiuje się ją jako iloraz mocy elektrycznej turbiny gazowej $N_{el,TG}$ do strumienia dwutlenku węgla oddawanego do otoczenia \dot{m}_{CO_2} :

$$E_{CO_2} = \frac{N_{el,TG}}{\dot{m}_{CO_2}} \quad (8)$$

Strumień dwutlenku węgla oddawanego do otoczenia zastosowany w równaniu (8) jest to iloczyn strumienia masowego spalin na wylocie z turbiny gazowej oraz udziału masowego dwutlenku węgla w spalinach wylotowych:

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_{4a} \cdot X_{CO_2} \quad (9)$$

3. Układ gazowy referencyjny oraz zmodyfikowany według idei Szewalskiego

Analizie porównawczej zostały poddane dwa układy gazowe zasilane metanem. Jednym z najistotniejszych parametrów wpływających na sprawność ekspandera jest temperatura spalin na wlocie do turbiny gazowej (im wyższa jest temperatura, tym można osiągać wyższe sprawności układu). Idea Szewalskiego zakłada zainstalowanie dwóch dodatkowych wymienników ciepła, sprężarki, a także upustów spalin za I, II i III stopniem turbiny gazowej w celu podgrzania medium trafiającego do komory spalania. W tabeli 1 zostały przedstawione podstawowe założenia dla obu układów.

Tabela 1

Podstawowe założenia dla układu gazowego referencyjnego oraz zmodernizowanego

Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Wartość opałowa paliwa	Wd	50,015	MJ/kg
Moc elektryczna turbiny gazowej	$N_{el.TG}$	200	MW
Sprawność wewnętrzna turbiny gazowej	$\eta_{i.TG}$	86,8	%
Sprawność wewnętrzna sprężarki	$\eta_{i,S}$	88,7	%
Sprawność mechaniczna turbiny gazowej i sprężarki	$\eta_{m.TG}=\eta_{m.S}$	99	%
Sprawność generatora	η_g	99	%
Temperatura wylotowa spalin	t_{4a}	630	°C

Wszystkie obliczenia zostały przeprowadzone dla 4 przyjętych wariantów:

- A. Wariant referencyjny
- B. Upust spalin za I stopniem turbiny gazowej
- C. Upust spalin za II stopniem turbiny gazowej
- D. Upust spalin za III stopniem turbiny gazowej

Strumień spalin był upuszczany w zakresie od 0 kg/s (wariant referencyjny) do maksymalnej wartości, przy której eksploatacja układu była bezpieczna. W tabeli 2 przedstawiono maksymalne strumienie spalin, jakie udało się osiągnąć kolejno za I, II oraz III upustem.

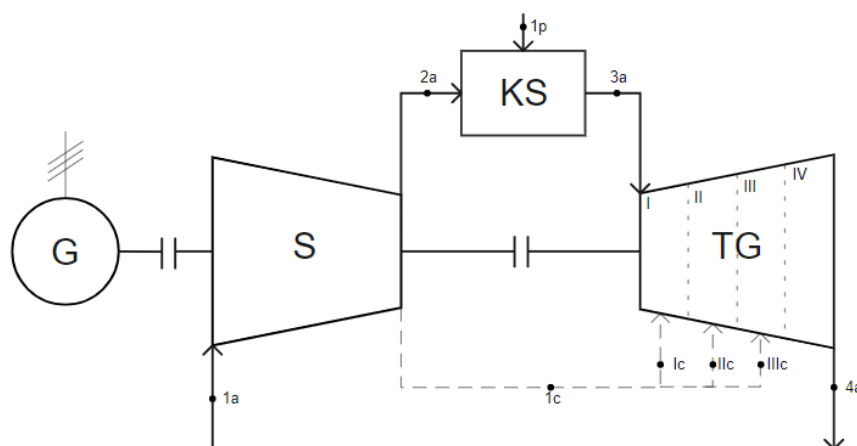
Tabela 2

Maksymalne wartości upuszczanego strumienia spalin za I, II i III stopniem turbiny gazowej

Wariant	Maksymalna wartość upuszczanego strumienia, kg/s
Upust spalin za I stopniem TG	309
Upust spalin za II stopniem TG	184
Upust spalin za III stopniem TG	91

3.1. Układ gazowy referencyjny

W modelu referencyjnym przedstawionym na rys. 1 powietrze pobierane jest z otoczenia, a następnie sprężone. Tak przygotowane powietrze o podwyższonej temperaturze i ciśnieniu trafia wraz z paliwem do komory spalania. W wyniku tego procesu powstają spaliny, które kierowane są do turbiny gazowej. Wskutek przepływu spalin wytwarzana jest moc mechaniczna, która napędza sprężarkę, a jej nadmiar oddawany jest do generatora, gdzie przetwarzany jest na energię elektryczną. Turbina gazowa składa się z 4 stopni, a każdy z nich chłodzony jest powietrzem w celu osiągnięcia temperatury metalu łopatek równej 1000°C.

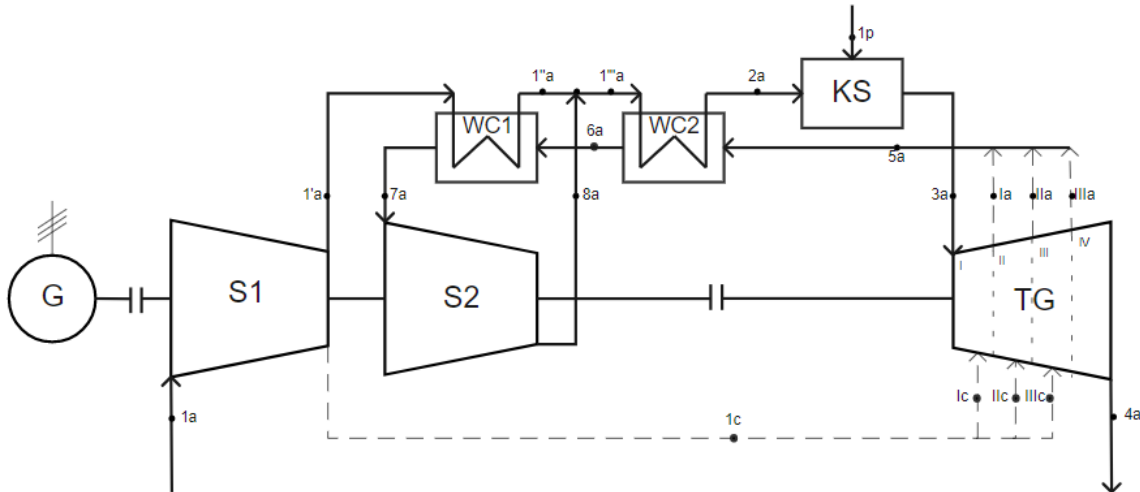


Rys. 1. Schemat modelu referencyjnego turbiny gazowej (S – sprężarka, KS – komora spalania, TG – turbina gazowa, G – generator)

Fig. 1. Diagram of a gas turbine reference model (S – compressor, KS – combustion chamber, TG – gas turbine, G – generator)

3.2. Układ gazowy według idei Szewalskiego

Modernizacja układu polegała na zainstalowaniu dwóch dodatkowych wymienników ciepła znajdujących się przed komorą spalania, sprężarki, a także upustów spalin za I, II i III stopniem turbiny gazowej. Ideą tej modernizacji stanowi zastosowanie upustu spalin za turbiną w celu podgrzania medium trafiającego do komory spalania. Na rys. 2 został przedstawiony schemat układu gazowego według idei Szewalskiego. Powietrze pobierane jest z otoczenia, a następnie sprężone analogicznie do przypadku wariantu referencyjnego. Powietrze podgrzewane jest spalinami w wymienniku ciepła WC1, a następnie miesza się z upuszczanymi spalinami i podgrzewane jest kolejno w wymienniku ciepła WC2. Tak przygotowane medium trafia do komory spalania, gdzie również doprowadzane jest paliwo. Następnie wytworzone spaliny kierowane są do ekspandera turbiny gazowej, w którym wytwarzana jest moc mechaniczna, a jej nadmiar kierowany jest do generatora energii elektrycznej.

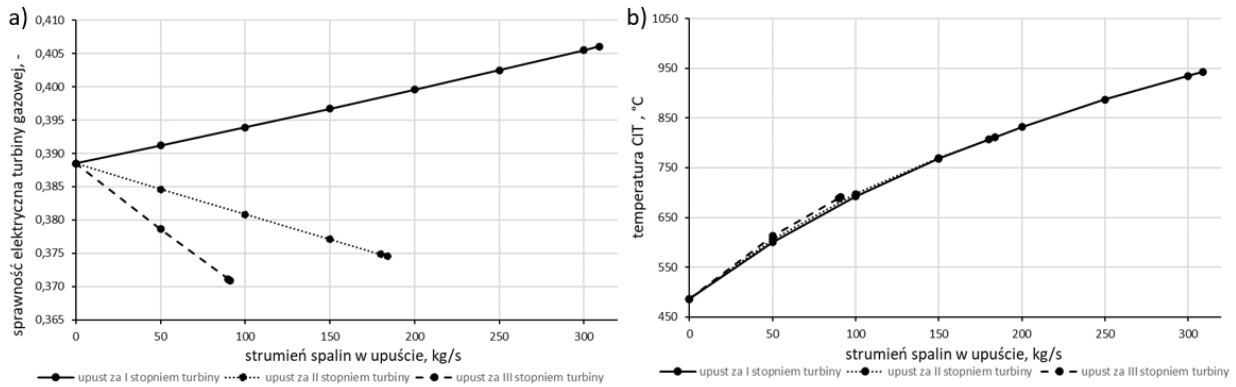


Rys. 2. Schemat modelu zmodernizowanego według idei Szewalskiego (S – sprężarka, KS – komora spalania, TG – turbina gazowa, G – generator, WC – wymiennik ciepła)

Fig. 2. Diagram of a model modernized by Szewalski's idea (S – compressor, KS – combustion chamber, TG – gas turbine, G – generator WC – heat exchanger)

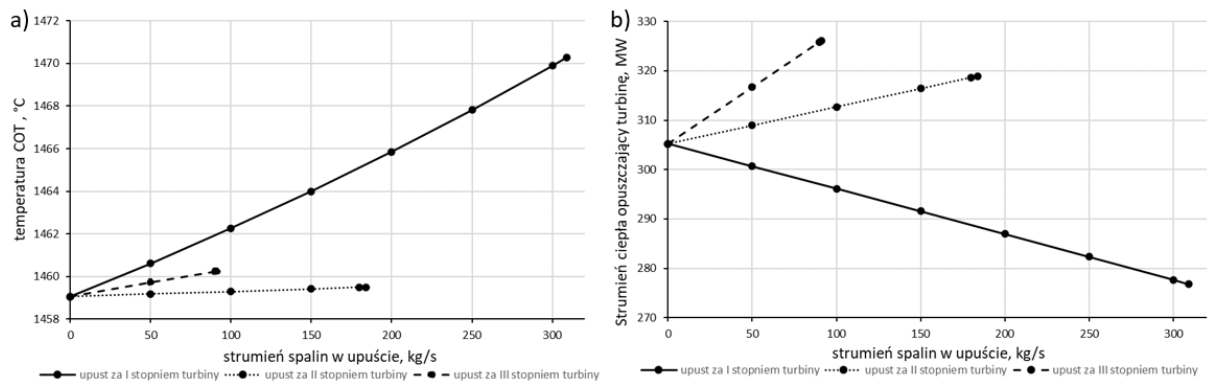
4. Analiza wyników

Pierwszym i najważniejszym badanym parametrem była sprawność elektryczna turbiny gazowej. Dla układu referencyjnego sprawność elektryczna wynosiła 38,85%. Po zastosowaniu upustu za I stopniem turbiny gazowej sprawność wzrosła, osiągając najwyższą wartość dla maksymalnego strumienia spalin upuszczanych równą 40,6%. Upust spalin za II oraz III stopniem turbiny gazowej przyczynił się do spadku sprawności względem wariantu referencyjnego. Na rys. 3a został przedstawiony wykres sprawności elektrycznej turbiny gazowej w funkcji strumienia spalin w upustach. Zastosowanie dodatkowych dwóch wymienników ciepła przed komorą spalania miało na celu podniesienie temperatury CIT, czyli temperatury medium przed wlotem do komory spalania. Dla trzech analizowanych upustów temperatura wzrosła. Największy wzrost następuje przy małych strumieniach upustu, a następnie zmniejsza się, gdy strumień spalin upuszczanych ulega zwiększeniu. Dla wariantu B (upust za I stopniem turbiny gazowej) udało się uzyskać wzrost o 456,3°C w stosunku do wariantu referencyjnego. Na rys. 3b została przedstawiona zmiana temperatury CIT w funkcji strumienia spalin w upustach.



Rys. 3. a) Sprawność elektryczna turbiny gazowej w funkcji strumienia spalin w upustach, b) temperatura COT w funkcji strumienia spalin w upustach
 Fig. 3. a) Electrical efficiency of a gas turbine as a function of the exhaust gas flow in the bleed, b) temperature CIT as a function of exhaust gas flow in the bleed

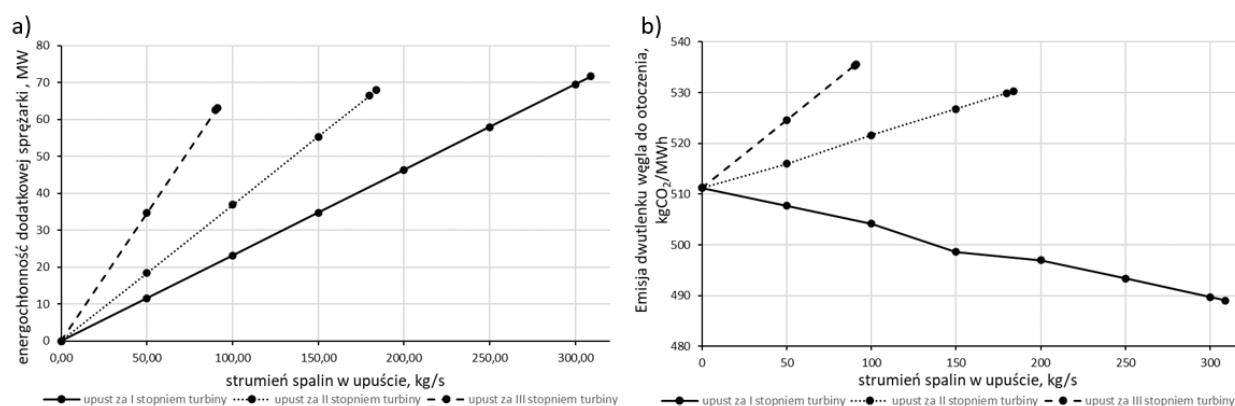
Temperatura COT, czyli temperatura spalin na wlocie do turbiny gazowej, znacznie wzrosła po zastosowaniu upustu spalin za I stopniem ekspandera turbiny gazowej, a jej wartość osiągnęła 1470,29°C dla maksymalnej wartości strumienia. Jest to wartość o 11,23°C większa od temperatury COT dla układu referencyjnego. W przypadku zastosowania pozostałych dwóch upustów temperatura ta wzrasta nieznacznie (mniej niż 1°C). Wykres temperatury COT w funkcji strumienia spalin w upustach przedstawiono na rys. 4a. Kolejnym analizowanym parametrem był strumień ciepła opuszczający turbinę gazową. Dla upustu za I stopniem turbiny gazowej wartość strumienia ciepła oddawanego do otoczenia maleje o 28,41 MW względem wariantu referencyjnego. Dla upustu za II i III stopniem turbiny strumień ciepła wzrasta. Wykres strumienia ciepła opuszczającego turbinę gazową w funkcji strumienia spalin w upustach został przedstawiony na rys. 4b.



Rys. 4. a) Temperatura COT w funkcji strumienia spalin w upustach, b) strumień ciepła opuszczający turbinę w funkcji strumienia spalin w upustach
 Fig. 4. a) Temperature CIT as a function of exhaust gas flow in the bleed, b) heat flow leaving the turbine as a function of exhaust gas flow in the bleed

Wykres energochłonności dodatkowej sprężarki w funkcji strumienia spalin w upuście został przedstawiony na rys. 5a. Dodatkową sprężarkę zamontowano za każdym upustem spalin z turbiny gazowej w celu wtłoczenia ich do rurociągu. Energochłonność każdej ze sprężarek zwiększała się wraz ze zwiększającą się wartością strumienia upuszczanego za ekspanderem

turbiny gazowej. Najwięcej mocy sprężarka pobierała, gdy upust spalin następował za III stopniem turbiny i dla wartości strumienia maksymalnego równego 91 kg/s było to 63,23 MW. Dla takiego samego strumienia w wariacie B (upust za I stopniem turbiny gazowej) energochłonność dodatkowej sprężarki wyniosła 21,09 MW. Jest to wartość około 3 razy mniejsza w stosunku do wariantu D (upust spalin za III stopniem). Przeanalizowana została również emisja dwutlenku węgla oddawanego do otoczenia. Dla wariantu A (referencyjnego) emisja wynosiła 511,27 kg CO₂/MWh. Upuszczając spaliny za I stopniem turbiny gazowej, można zauważyć spadek emisji CO₂ i dla maksymalnego strumienia równego 309 kg/s wynosi ona 489,04 kg CO₂/MWh. Dla pozostałych wariantów (C i D) wraz ze zwiększającym się strumieniem spalin upuszczanych emisja wzrasta. Emisja dwutlenku węgla w funkcji strumienia spalin w upuście została przedstawiona na rysunku 5b.



Rys. 5. a) Energochłonność dodatkowej sprężarki w funkcji strumienia spalin w upuście, b) emisja dwutlenku węgla do otoczenia w funkcji strumienia spalin w upuście

Fig. 5. a) Energy intensity of the additional compressor as a function of exhaust gas flow in the bleed, b) carbon dioxide emissions to the environment as a function of exhaust gas flow in the bleed

5. Podsumowanie

Zastosowanie idei Szewalskiego pozwoliło na poprawę sprawności elektrycznej turbiny gazowej przy wykorzystaniu upustu za I stopniem ekspandera turbiny gazowej. Dla maksymalnego strumienia upuszczanych spalin wynoszącego 309 kg/s osiągnięto sprawność 40,6% i jest to o 1,75 punktu procentowego więcej niż dla wariantu referencyjnego. W przypadku upustu za II i III stopniem turbiny gazowej sprawność nie została zwiększona. Badany zakres strumienia upuszczanego z ekspandera nie ma swojego optimum dla osiągnięcia wzrostu sprawności turbiny gazowej. Wzrost sprawności w przypadku wariantu B ma charakter liniowy. Wzrost sprawności następuje wraz ze zwiększeniem strumienia upuszczanych spalin. Dla wariantów C i D, gdzie następuje spadek sprawności turbiny gazowej, charakterystyka również przyjmuje charakter liniowy.

Zastosowanie upustów pozwoliło na podniesienie temperatury czynnika na wlocie do komory spalania, a upust za I stopniem turbiny gazowej zwiększył również temperaturę spalin na wlocie do ekspandera turbiny gazowej o 11,23°C w porównaniu z wariantem bez upustów, co pozwoliło na uzyskanie wyższej sprawności dla tego wariantu.

Strumień ciepła oddawanego do otoczenia zmniejszył się tylko dla wariantu B (upust spalin za I stopniem turbiny gazowej) i dla maksymalnego strumienia upuszczanych spalin wynosił 276,802 MW, co jest o 28,41 MW mniej niż dla układu gazowego przed modernizacją. Przy zastosowaniu upustów za II i III stopniem turbiny gazowej strumień ciepła wylotowego wzrastał.

Zastosowanie dodatkowej sprężarki w celu wtłoczenia spalin do rurociągu wiąże się z dodatkowym poborem mocy, który jest największy dla wariantu D i dla tej samej wartości strumienia spalin upuszczanych wynosi 3 razy więcej niż dla wariantu B i prawie dwa razy więcej niż dla wariantu C.

Jednym z największych wyzwań stojących przed energetyką wielkoskalową jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, w tym dwutlenku węgla. Układy gazowe charakteryzują się dużo mniejszą emisją niż układy zasilane węglem, w których emisja wynosi około 800 kg CO₂/MWh. Zastosowanie upustu za I stopniem pozwoliło na zmniejszenie emisji o 22,24 kg CO₂/MWh w stosunku do wariantu referencyjnego, w którym emisja wyniosła 511,27 kg CO₂/MWh.

Otrzymane wyniki są bardzo zadowalające, ponieważ oprócz poprawy charakterystyk termodynamicznych udało się również otrzymać pozytywny wydzźwięk środowiskowy związany z ograniczeniem emisji dwutlenku węgla do otoczenia.

Praca naukowa finansowana w ramach badań statutowych Politechniki Śląskiej.

Bibliografia

1. Badyda K.: Perspektywy rozwoju technologii turbin gazowych oraz bloków gazowo-parowych. Rynek Energii, nr 4/2014, s. 74-82.
2. Błachnio J., Bogdan M., Zasada D.: Wpływ podwyższonej temperatury na trwałość łopatek turbiny. Eksploatacja i Niezawodność 2017, 19 (1), s. 48-53.
3. Nowak G.: Optymalizacja kanałów wewnętrznego chłodzenia łopatek turbiny gazowej. 2011.
4. Badyda K.: Charakterystyki złożonych układów z turbinami gazowymi. Rynek Energii nr 3/2010, s. 80-86.
5. Badyda K., Miller A.: Energetyczne turbiny gazowe oraz układy z ich wykorzystaniem. Wydawnictwo Kaprint, Lublin 2014.
6. Kotowicz J.: Stan i perspektywy rozwoju układów gazowo-parowych. Archiwum Energetyki, nr 1, tom XLII, 2012, s. 23-28.

7. Jesionek K., Chrzczonowski A.: Polepszanie własności układu STIG poprzez przegrzew i chłodzenie międzystopniowe. Polskie Towarzystwo Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej nr 34, tom 3, s. 43-48.

WPLYW ZASTOSOWANIA IDEI SZEWALSKIEGO NA WZROST SPRAWNOŚCI TURBINY GAZOWEJ

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę porównawczą układu gazowego referencyjnego oraz układu gazowego zmodernizowanego według idei Szewalskiego. Istotą modernizacji było zaimplementowanie dodatkowych dwóch wymienników ciepła, sprężarki oraz zastosowanie upustu strumienia spalin za I, II i III stopniem turbiny gazowej w celu podgrzania medium trafiającego do komory spalania, a tym samym podniesienia sprawności układu. Strumienie spalin były zadawane od wartości 0 kg/s dla wariantu referencyjnego do strumienia maksymalnego, przy którym eksploatacja turbiny gazowej była bezpieczna. W artykule zdefiniowano, dla którego z upustów sprawność rośnie, a także pokazano, który z analizowanych wariantów jest w stanie ograniczyć emisję dwutlenku węgla do otoczenia.

Słowa kluczowe: turbina gazowa, idea Szewalskiego, wzrost sprawności

INFLUENCE OF THE APPLICATION OF THE SZEWALSKI'S IDEA ON THE INCREASE IN EFFICIENCY OF A GAS TURBINE

Abstract

The paper presents a comparative analysis of the reference gas system and the gas system upgraded according to Szewalski's idea. The essence of the modernisation was the implementation of two additional heat exchangers, a compressor and the use of an exhaust gas stream bleed after the I, II and III stages of the gas turbine in order to heat the medium entering the combustion chamber and thus increase the efficiency of the system. The exhaust gas fluxes were set from a value of 0 kg/s for the reference variant to a maximum flux at which it was safe to operate the gas turbine. The paper defines for which bleed the efficiency increase and also shows which of the analysed variants is able to reduce carbon dioxide emissions to the environment.

Keywords: gas turbine, Szewalski's idea, efficiency increase

Artur BUDZYŃSKI

OPRACOWANIE METODY DOBORU CECH DO MODELU UCZENIA MASZYNOWEGO PROGNOZUJĄCEGO CENĘ ZA USŁUGĘ TRANSPORTU DROGOWEGO TOWARU

1. WSTĘP

Obecnie sytuacja transportu drogowego towarów w Unii Europejskiej zależy od wielu czynników, w tym od koniunktury gospodarczej, pandemii COVID-19 i zmian w polityce i regulacjach dotyczących transportu. Ze względu na pandemię COVID-19 w 2020 roku wiele krajów wprowadziło ograniczenia w przemieszczaniu się, co wpłynęło na ruch towarowy na drogach. Jednakże, wraz z postępującą kampanią szczepień i zmniejszającym się wpływem pandemii na gospodarkę, transport towarów na drogach UE powoli zaczyna się odbudowywać. Obecnie w UE kontynuuje się prace nad wdrożeniem zasad „zrównoważonego transportu”, co ma na celu zmniejszenie negatywnego wpływu transportu na środowisko naturalne. W związku z tym UE wprowadza regulacje dotyczące emisji spalin dla pojazdów ciężarowych i zachęca do korzystania z bardziej ekologicznych rozwiązań, takich jak transport kolejowy czy transport morski. Wśród innych wyzwań, z którymi UE się boryka, jest przeciążenie dróg, zwłaszcza w sezonie letnim, kiedy większość osób podróżuje na wakacje. To może prowadzić do opóźnień w dostawach towarów i wyższych kosztów transportu. Sytuacja transportu drogowego towarów w Unii Europejskiej jest złożona i zależy od wielu czynników. Jednakże, ze względu na dalszy rozwój technologii i postępujące wprowadzanie zasad zrównoważonego transportu, można spodziewać się zmian w branży transportowej w najbliższych latach.

W [1] przedstawiono model prognozowania ceny za usługę transportu drogowego towaru wykorzystujący sieci neuronowe. W [2] porównano błędy popełniane przez model uczenia maszynowego i ludzi oraz wykazano lepszą jakość modelu. Modele uczenia maszynowego z powodzeniem mogą być wdrażane w celu poprawy efektywności zarządzania procesami transportowymi, czego przykładem jest wdrożenie w hucie stali [3]. Obecnie wiele czynności wykonywanych przez ludzi jest wspieranych przez aplikacje internetowe. W [4] przedstawiono zastosowanie modelu, uczenia maszynowego w aplikacji internetowej prognozującej cenę za

usługę transportu drogowego. Takie działanie pozwala na walidowanie działania modelu bazując na informacji zwrotnej od większej liczby ludzi chcących korzystać z usług transportu drogowego rzeczy.

1.1. Usługa transportowa

Giełda transportowa to internetowa platforma, która umożliwia przewoźnikom i firmom logistycznym zlecanie oraz wykonywanie przewozów. Na giełdzie transportowej przedsiębiorcy mogą ogłaszać dostępne ładunki oraz wolne pojazdy, co umożliwia skuteczne i szybkie znalezienie partnerów biznesowych, którzy są zainteresowani przewozem towarów w danym kierunku. Dzięki giełdzie transportowej przedsiębiorcy mogą znaleźć partnerów biznesowych w krótkim czasie, co pozwala na szybsze wykonanie zamówienia i dostarczenie towarów do klienta. Korzystanie z giełdy transportowej umożliwia zaoszczędzenie czasu i pieniędzy, ponieważ przedsiębiorcy nie muszą szukać partnerów biznesowych samodzielnie oraz negocjować warunków przewozu, co jest czasochłonne i kosztowne. Giełdy transportowe działają przez całą dobę i są dostępne z różnych miejsc na świecie, dzięki czemu przedsiębiorcy mogą nawiązać kontakty biznesowe z partnerami z innych krajów. Na giełdzie transportowej działa wiele profesjonalnych firm, które zapewniają wysoką jakość usług oraz bezpieczeństwo przewozów. Dzięki giełdzie transportowej przedsiębiorcy mogą śledzić przesyłki w czasie rzeczywistym i na bieżąco informować swoich klientów o statusie przewozu. Jak wynika z badań [5], Trans.eu i TimoCom są kluczowe na rynku europejskim. Opierając się na przeglądzie literatury, zdecydowano się na wykorzystanie dobrych praktyk i opracowanie nowej uniwersalnej metody zapisu danych o przewozie towaru.

2. Metodyka

W pracy dokonano przeglądu i analizy literatury. Przegląd można podzielić na części dotyczące opracowanych metod na prognozowanie ceny za usługę transportu towaru oraz obecnie stosowanych metod zapisu danych o ofertach transportowych. Ma to na celu opracowanie odpowiedniej metody do trenowania modelu. Przygotowanie danych jest kluczowym etapem w projekcie uczenia maszynowego. Odpowiednie przygotowanie danych może mieć istotny wpływ na skuteczność modelu.

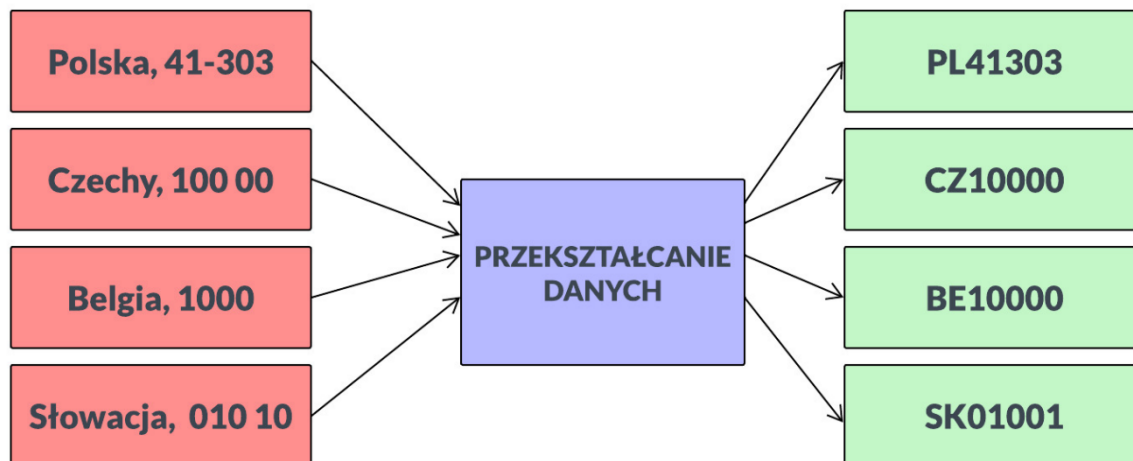
Do przetwarzania danych wykorzystano bibliotekę Pandas [6]. Przetwarzanie danych można wykonać w innym oprogramowaniu, jednakże Pandas jest bardzo efektywny w pracy z dużymi zbiorami danych.

3. Jednolita metoda zapisu danych

Opracowanie jednolitej metody zapisu informacji przyczynowych zapobiega występowaniu błędów i niejasności w danych. Błędów i niejasności w danych można uniknąć dzięki wspólnemu sposobowi przechowywania danych. Jeśli dane nie są spójne i jednolite, może to prowadzić do błędów w szkoleniu modelu, co z kolei wpływa na dokładność i wydajność modelu. Ujednolicona pamięć masowa oraz ujednolicona metoda przechowywania danych ułatwiają przetwarzanie i analizę danych. Wszystkie informacje są w jednym formacie, więc łatwo je porównywać, łączyć i analizować. Ujednolicona metoda przechowywania danych ułatwia skalowanie uczenia maszynowego. Ponieważ wszystkie dane są w tym samym formacie, łatwiej je przetwarzać na większą skalę i łatwiej przenosić model między różnymi platformami i systemami. Powszechna metoda przechowywania danych ułatwia uzyskiwanie powtarzalnych wyników. Oznacza to, że inni badacze mogą łatwiej powielać wyniki badań i weryfikować ich ważność. W procesie uczenia modelu uczenia maszynowego spójny sposób przechowywania danych jest niezbędny, ponieważ pomaga uniknąć błędów danych i niejednoznaczności, ułatwia przetwarzanie i analizę danych oraz pozwala na łatwiejsze skalowanie i replikację wyników.

3.1. Lokalizacja

Kraje Unii Europejskiej mają różne metody zapisu kodów pocztowych. Do przetwarzania danych niezbędna jest metoda jednolita. Proponuje się zapis składający się z 2 liter oznaczających państwo i 5 przedstawiających kod pocztowy. Proponuje się usunięcie spacji i myślników wewnątrz kodu. W przypadku mniejszych krajów stosujących czterocyfrowy zapis w kodzie proponuje się dopisanie na końcu zera. Proponuje się oznaczenie krajów przez 2 cyfry według standardu International Organization for Standardization [7]. Nazwy miast są wartością, która często się powtarza w różnych lokalizacjach. Uznaje się, że przedstawienie lokalizacji za pomocą kodów pocztowych jest wystarczająco precyzyjne. Przykład przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykład przekształcania danych określających lokalizację

Fig. 1. An example of transforming location data

Źródło: opracowanie własne

3.2. Typ nadwozia

Typ zabudowy pojazdu ciężarowego to termin odnoszący się do rodzaju przestrzeni ładunkowej umieszczonej na podwoziu ciężarowym. Zabudowy ciężarówek różnią się w zależności od rodzaju ładunku, który mają przewozić. Tabela 1 przedstawia analizę metody zastosowanej na giełdach Trans.eu [8] oraz TimoCom [9] i własną wersję zapisu. W przypadku możliwości przewozu towaru więcej niż jednym typem naczepy wpisuje się je w kolejności alfabetycznej, oddzielając każdy przecinkiem i spacją.

Tabela 1

Zapis danych dotyczących typu zabudowy

TIMOCOM	TRANS.EU	PROPONOWANY ZAPIS
autotransporter	ławeta	autotransporter
bramowiec	-	bramowiec
chłodnia	chłodnia	chłodnia
ciągnik siodłowy	-	ciągnik siodłowy
ciężarówka specjalistyczna	-	ciężarówka specjalistyczna
coilmulda	-	coilmulda
cysterna	-	cysterna
firanka (tautliner)	firanka	firanka
furgon (van)	-	-
hakowiec	-	hakowiec
-	hakówka	hakówka

TIMOCOM	TRANS.EU	PROPONOWANY ZAPIS
inloader / naczepa do przewozu szkła	-	inloader
izoterma	izoterma	izoterma
jumbo	-	jumbo
mega	mega	mega
naczepa podkontenerowa	-	naczepa podkontenerowa
naczepa rozciągana typu telesattel	-	naczepa rozciągana typu telesattel
naczepa z pochyłą platformą	-	naczepa z pochyłą platformą
niskopodwoziówka	-	niskopodwoziówka
plandeka	standard	plandeka
platforma	-	platforma
pojazd z wymienną skrzynią ładunkową	-	pojazd z wymienną skrzynią ładunkową
ruchoma podłoga	-	ruchoma podłoga
ruchoma podłoga (towar sypki)	-	ruchoma podłoga (towar sypki)
silos	-	silos
skrzynia	skrzynia	skrzynia
skrzynia otwarta	-	skrzynia otwarta
wywrotka	wywrotka	wywrotka

Rysunek 2 przedstawia chmurę tagów opracowaną na podstawie analizy. Analiza wizualna pozwala na lepsze zrozumienie danych. Kolorem jasnozielonym oznaczone są naczepy, które wystąpiły na 2 giełdach i są proponowane w nowej metodzie. Kolorem ciemnozielonym oznaczone są typy, które wystąpiły na jednej giełdzie i są proponowane w nowej metodzie. Kolorem czerwonym oznaczone są typy, które wystąpiły na giełdzie, ale nie proponuje się ich w nowej metodzie. TimoCom ma wyraźnie większy wybór w rodzaju naczepy, co pozwala precyzyjnie określić wymagania. Uznano, że naczepa typu furgon nie jest typem naczepy, tylko typem pojazdu. Standard oznacza to samo co plandeka, dlatego zrezygnowano z określenia standard i zdecydowano się używać określenia plandeka. Analogiczna sytuacja jest ze zrezygnowaniem z używania terminu laweta na korzyść określenie autotransporter.



Rys. 2. Typy zabudowy w pojazdach ciężarowych

Fig. 2. Body type in trucks

Źródło: opracowanie własne na podstawie (TimoCom, 04.04.2023) (Trans.eu, 04.04.2024)

3.3. Typ pojazdu

Typy pojazdów ciężarowych różnią się od siebie przede wszystkim możliwościami dotyczącymi objętościowych i wagowych możliwości przewozowych. Tabela 2 przedstawia porównanie metod stosowanych w opisie typu pojazdu. Przeanalizowano go i poddano ocenie. Proponuje się zapis stosowany w TimoCom. Uznano zapis, który w jasny i wyczerpujący sposób opisuje wymagany typ pojazdu.

Tabela 2

Zapis danych dotyczących typu pojazdu

TIMOCOM	TRANS.EU	PROPONOWANY ZAPIS
ciągnik z naczepą	z naczepą	ciągnik z naczepą
pojazd z przyczepą	z przyczepą	pojazd z przyczepą
pojazd ciężarowy do 12 t	solówka	pojazd ciężarowy do 12 t
pojazd ciężarowy do 7,5 t	solówka	pojazd ciężarowy do 7,5 t
pojazd ciężarowy do 3,5 t	bus	pojazd ciężarowy do 3,5 t

3.4. Zabezpieczenie ładunku

Zabezpieczanie ładunku ciężarówki to proces zapewniający, że ładunek przewożony w pojeździe jest odpowiednio zabezpieczony przed przemieszczaniem się, przesunięciem lub spadnięciem podczas transportu. Jest to bardzo ważne, ponieważ niewłaściwie zabezpieczony ładunek może być przyczyną poważnych wypadków drogowych, zagrożenia życia i zdrowia

ludzi oraz szkód materialnych. Na przykład poruszający się ładunek może przesunąć się i przetoczyć po całej ciężarówce podczas jazdy, powodując poważne obrażenia lub śmierć kierowcy, pasażerów i innych użytkowników dróg. Zabezpieczenie ładunku zapewnia również, że towar dotrze w dobrym stanie, bez obrażeń i strat materialnych, co jest ważne dla firm transportowych i ich klientów. Odpowiednie zabezpieczenie ładunku jest zatem niezbędne dla bezpieczeństwa na drogach i efektywnej logistyki transportu. Dlatego kierowcy i pracownicy transportu muszą być odpowiednio przeszkoleni i świadomi znaczenia zabezpieczenia ładunku przed każdym transportem.

Tabela 3 przedstawia analizę obecnie występującej metodyki zapisu oraz opracowaną na tej podstawie propozycję zapisu. Kluczowymi elementami zabezpieczenia towaru są: maty, i kątowniki. Towary wymagające zabezpieczenia dużą ilością sprzętu są bardziej kłopotliwe dla firmy przewozowej. Może to powodować wzrost cen. Proponuje się dla tych typów zabezpieczenia wprowadzić zapis liczbowy. W pozostałych przykładach – zerojedynekowy.

Tabela 3

Zapis danych dotyczących zabezpieczenia towaru

TIMOCOM	TRANS.EU	PROPONOWANY ZAPIS
belka zaciskowa	-	belka zaciskowa
burty	-	burty
kłonicie	-	kłonicie
listwy perforowane	-	listwy perforowane
maty antypoślizgowe	maty antypoślizgowe	maty; liczba = x
odciągi łańcuchowe	-	odciągi łańcuchowe
osłona krawędzi	osłona krawędzi	kątowniki; liczba = x
pasy mocujące	pasy transportowe	pasy; liczba = x
szyna do blokowania palet	-	szyna do blokowania palet

4. Inne

Tabela 4 przedstawia inne cechy ważne dla modelu i sposób ich przedstawiania. Dłuższy termin płatności może oznaczać większą cenę. Przewoźnik preferuje mieć płatność za usługę jak najszybciej. Dokumenty coraz częściej można przysyłać drogą elektroniczną. Ten sposób zmniejsza koszty, co może powodować zmniejszenie ogólnej ceny za usługę. Droższy towar jest najczęściej bardziej narażony na kradzieże. Bardzo drogi towar może również wymagać specjalnego ubezpieczenia, co może przełożyć się na wyższy koszt końcowy. Cena paliwa w oczywisty sposób wpływa na zwiększenie ceny za usługę. Uwzględnienie ceny paliwa w prognozowaniu pozwala przygotować się na różne ceny w przyszłości.

Zapis danych dotyczących zabezpieczenia towaru

Cecha	Komentarz
Termin płatności	Cecha numeryczna wyrażona w dniach
Dokumenty	0 = pocztą; 1 = elektronicznie
Wartość towaru	Cecha numeryczna wyrażona w €
Cena paliwa	Cena [zł/dm ³]

5. Wnioski

W obecnych czasach produkuje się dane z wielu źródeł. Powszechnie stosuje się coraz częściej metody pracy z dużymi zbiorami danych i uczeniem maszynowym. Dotyczy to również obszaru logistyki i transportu. Praca z danymi wymaga dobrego zrozumienia danych oraz ich odpowiedniego zapisu.

Czyszczenie i przetwarzanie danych jest czasochłonne. Zastosowanie zaproponowanej w artykule metodyki pozwoli ujednoczyć rynek. Konsekwencją tego będzie łatwiejszy dostęp do danych oraz ich interpretacja. Pozwoli to w bardziej efektywny sposób trenować modele uczenia maszynowego.

Stwierdza się w obecnie stosowanej metodyce brak jednoznacznej interpretacji, co jest typem pojazdu, typem zabudowy i dodatkowym wyposażeniem. W przyszłych badaniach warto przeanalizować, jaka jest różnica między elementem wyposażenia a typem zabudowy.

Opis typu pojazdu powinien w sposób jasny i wyczerpujący określić wymagania. Proponuje się tutaj słownictwo profesjonalne, unikając potocznych określeń.

Bibliografia

1. Budzyński A., Sładkowski A. (2018). Transport exchanges, as one of the promising solutions for the problems of transport logistics. Proc. of the IV Polish - Georgian Scientific-Technical Conference „Transport Bridge Europe – Asia” (pp. 14-22). Tbilisi: GTU.
2. Budzyński A., Sładkowski A. (2021). Predykcja cen w transporcie drogowym z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. XIII Int. Sci. Conf. & X Int. Symposium of Young Researches „Transport Problems’2021”. Conference Proceedings (pp. 137-151). Katowice: Politechnika Śląska.
3. Budzyński A., Sładkowski A. (2022). Implementation machine learning model into web application for freight price prediction in road transport. XX European Transport Congress & XII. International Conference on Transport Sciences (pp. 132-139). Győr: University of Győr.

4. Budzyński A., Sładkowski A. (2022). The Use of Machine Learning To Improve Road Transport Management Proces. XIV Int. Sci. Conf. & XI Int. Symposium of Young Researches „Transport Problems’2022” (s. 820-829). Katowice: Politechnika Śląska.
5. Budzyński A., Sładkowski A., Malinowski P. (2022). The use of machine learning to manage transport processes in a steel mill on the example of the company „Huta Pokój Profile”. Proc. of 6th Georgian-Polish Int. Sci. Conf. „Transport Bridge Europe – Asia” (pp. 13-19). Tbilisi: GTU.
6. McKinney. (2010). Data structures for statistical computing in python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference (Volume 445).
7. Standardization, I. O. (04.04.2024). ISO 3166. <https://www.iso.org/obp/ui/#search>.
8. TimoCom. (04.04.2023). www.timocom.pl.
9. Trans.eu. (04.04.2024). www.trans.eu.

OPRACOWANIE METODY DOBORU CECH DO MODELU UCZENIA MASZYNOWEGO PROGNOZUJĄCEGO CENĘ ZA USŁUGĘ TRANSPORTU DROGOWEGO TOWARU

Streszczenie

Artykuł porusza tematykę prognozowania ceny za usługę transportu drogowego towaru. Według cyklu życia modelu uczenia maszynowego skupiono się na etapie zbierania i przetwarzania danych. Przeanalizowano literaturę dotyczącą trenowania i wdrażania modeli uczenia maszynowego. Zaproponowano jednolitą metodę zapisu danych o przewozie towaru. Zaproponowana metoda pozwoli w bardziej efektywny sposób trenować modele uczenia maszynowego w przyszłości.

Słowa kluczowe: transport, logistyka, przetwarzanie danych, uczenie maszynowe

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR SELECTING FEATURES FOR A MACHINE LEARNING MODEL FORECASTING THE PRICE FOR ROAD TRANSPORT OF GOODS

Abstract

The article deals with the subject of price forecasting for the road transport of goods. According to the life cycle of the machine learning model, the focus was on the stage of data collection and processing. The literature on training and deploying machine learning models was reviewed. A uniform method of recording data on the transport of goods has been proposed. The proposed method will allow for more effective training of machine learning models in the future.

Keywords: transport, logistic, data processing, machine learning

Wioletta CEBULSKA

EMISJA POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI PRZEZ HULAJNOGI ELEKTRYCZNE

1. Wprowadzenie

W obecnych czasach niemal wszędzie spotyka się urządzenia zasilane energią elektryczną, stale zwiększa się również liczba użytkowników sprzętów elektronicznych, między innymi hulajnóg elektrycznych. Urządzenia te są źródłami promieniowania elektromagnetycznego. Rozwój wielu dziedzin nauki i techniki doprowadził do szerokiego zastosowania energii elektrycznej w gospodarce, a także życiu codziennym człowieka. W związku z tym ludzie stale są narażeni na działanie pola elektromagnetycznego o różnych częstotliwościach. Częstym tematem do dyskusji jest więc wpływ pola elektromagnetycznego na zdrowie człowieka.

Pole elektromagnetyczne w zależności od wielkości natężenia oraz od częstotliwości może powodować różne dolegliwości u osób mających częsty kontakt z urządzeniami elektronicznymi. Niekorzystnym rezultatem takiego promieniowania może być tzw. efekt termiczny występujący wskutek przemiany energii promieniowania na ciepło. Wywołuje to zmiany patologiczne na ludzkim ciele. Istnieje także efekt pozatermiczny, powstały bez podwyższenia temperatury ciała pod wpływem promieniowania, dokonując w nim zmian patofizjologicznych [1].

W przypadku pola elektrycznego miarą narażenia do jego oceny jest natężenie pola elektrycznego pierwotnego, mierzonego pod nieobecność pracownika na stanowisku pracy. Pole elektryczne może spowodować w tkankach człowieka deformacje. Z kolei w przypadku pola magnetycznego miarą zagrożenia tych pól dla zdrowia jest pierwotne natężenie pola magnetycznego, także mierzonego na stanowisku pracy pod nieobecność pracownika [2, 3].

Ze względu na rosnącą liczbę użytkowników hulajnóg elektrycznych wydaje się konieczne zbadanie emisji pola elektromagnetycznego przez to urządzenie. Spora liczba osób przechowuje oraz ładuje swoje hulajnogi elektryczne w domu, więc ma bezpośredni kontakt z polem elektromagnetycznym wytwarzanym przez to urządzenie oraz jego ładowarkę.

2. Fizyczne ujęcie pola elektrycznego, magnetycznego, indukcji magnetycznej oraz gęstości mocy

Pole elektryczne jest to pole wytwarzane w otoczeniu naładowanego przewodnika. Natężenie pola elektrycznego stanowi siła, która wywiera pole elektryczne na ładunek jednostkowy, a wyrażone jest w woltach na metr (V/m), natomiast pole magnetyczne jest to stan przestrzeni, w której siły działają na poruszające się ładunki elektryczne, a także na ciała mające moment magnetyczny niezależnie od ich ruchu. Natężenie pola magnetycznego wyraża się w amperach na metr (A/m) [4]. Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego przedstawiają wzory (1) oraz (2).

$$H = f(I) \quad (1)$$

$$E = f(U) \quad (2)$$

gdzie:

I – natężenie prądu, A,

U – napięcie, V,

E – natężenie pola elektrycznego, V/m,

H – natężenie pola magnetycznego, A/m.

Pole magnetyczne, oprócz pola elektrycznego, jest przejawem pola elektromagnetycznego o częstotliwościach w przedziale od 0 Hz (pola stałe) do 300 GHz (promieniowanie mikrofalowe). Powyżej górnej granicy wskazanego zakresu wyróżnia się promieniowania: podczerwone, widzialne, nadfioletowe, rentgenowskie, gamma oraz promieniowanie kosmiczne. Pola elektromagnetyczne dzielą się na naturalne oraz te wytwarzane sztucznie. Naturalne pola związane są ze zjawiskami występującymi w atmosferze (np. wyładowania elektryczne podczas burzy), z kolei pola wytwarzane sztucznie są przejawem działalności człowieka. Mogą się one różnić długością fali, częstotliwością, natomiast wspólną ich cechą jest taka sama prędkość rozchodzenia się w próżni [1].

Do scharakteryzowania pól magnetycznych małych częstotliwości stosowana jest często wielkość alternatywna dla natężenia pola magnetycznego – indukcja magnetyczna wyrażona w teslach (T) lub gaussach (Gs).

Indukcja magnetyczna jest podstawową wielkością opisującą pole magnetyczne. Opisuje natężenie pola magnetycznego wewnątrz ciała. Jednostką indukcji magnetycznej jest mikrotesla [μT] lub miligauss [mG].

Indukcję magnetyczną przedstawia wzór (3).

$$B = \mu H \quad (3)$$

gdzie:

B – indukcja magnetyczna, μT ,

μ – przenikalność magnetyczna, $T \cdot m/A$,

H – natężenie pola magnetycznego, A/m .

Gęstość mocy jest to moc na jednostkę powierzchni w stosunku do kierunku rozchodzenia się promieniowania. Wyraża się ją w watach na metr kwadratowy [W/m^2].

Promieniowanie niejonizujące nie ma tyle energii, by stworzyć jony, dlatego przez wiele lat było uważane za nieszkodliwe. Promieniowanie to towarzyszy pracy urządzeń zasilanych prądem elektrycznym, a więc obecne jest przy pracy silnika elektrycznego oraz wokół przewodów doprowadzających energię elektryczną z baterii do silnika. Międzynarodowa Komisja Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym ICNIRP ma na celu ochronę ludzi i środowiska przed niekorzystnymi skutkami promieniowania niejonizującego. W tym celu ICNIRP opracowuje i rozpowszechnia naukowe porady dotyczące ograniczania narażenia na promieniowanie niejonizujące [2, 3].

3. Wpływ pola elektromagnetycznego na człowieka

Zagrożenia związane z polem elektromagnetycznym, ze względu na fakt, że są niewidoczne dla oka ludzkiego oraz są niewyczuwalne przez ciało człowieka, są wyjątkowym typem zagrożenia. W wielu zakładach pracy pracownicy wykonujący swoją pracę codziennie obsługują różnorodne urządzenia, które niejednokrotnie narażają ich na działanie pola elektromagnetycznego o dużych natężeniach. Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizm człowieka dzieli się na trzy grupy:

- oddziaływanie bezpośrednie na organizm ludzki (przy energii pierwotnych źródeł pól),
- pośrednie oddziaływanie na organizm energii ze źródeł pól wtórnych,
- wspólne oddziaływanie pierwotnych i wtórnych źródeł pól energii z infrastruktury technicznej.

Bezpośrednie działanie pola elektromagnetycznego jest to takie działanie, które powoduje skupienie się sił linii pola w organizmie przez zwiększenie się parametrów wartości elektrycznych tkanek w stosunku do powietrza. Powoduje to przepływ prądów, które, gdy uzyskają odpowiednio wysoką wartość, mogą oddziaływać w organizmie człowieka na system nerwowy, a ponadto wydzielone ciepło podnosi dodatkowo temperaturę tkanek.

Zasadniczo rozróżnia się dwa skutki oddziaływania pola elektromagnetycznego na organizm człowieka – termiczne oraz nietermiczne. Oddziaływania termiczne należy rozpatrywać dla pola elektromagnetycznego o częstotliwości powyżej 100 kHz. Objawia się ono wzrostem temperatury tkanek przez wchłonięcie energii pola elektromagnetycznego, w wyniku czego następuje ich uszkodzenie spowodowane przez przegrzanie. Z kolei oddziaływanie nietermiczne należy rozpatrywać przy ekspozycji na pole elektromagnetyczne o częstotliwości poniżej 100 kHz. Oddziaływanie te występują jako postać prądów indukowanych wewnątrz ciała przez bezpośrednie sprzężenie z polem elektromagnetycznym tkanek, a także w postaci prądów kontaktowych, które przepływają przez człowieka w chwili dotykania elementów konstrukcji metalowej, odbierającego energię pola elektromagnetycznego, które tworzy wtórną energię źródła. Wielkość tego działania charakteryzuje parametr gęstości prądu w częściach ciała organizmu lub też prąd, który całkowicie przepływa przez ciało człowieka [4, 5].

Prowadzono badania nad możliwością powstania negatywnych skutków zdrowotnych dotyczących pola elektrycznego. Wyniki dokonanych analiz doprowadziły do wniosku, że pola te nie powodują zagrożeń dla zdrowia człowieka. W latach 90. zostały wykonane badania epidemiologiczne w stosunku do ryzyka zachorowania na choroby nowotworowe u osób przebywających w podwyższonych sieciowo polach magnetycznych (wśród pracowników energetyki oraz u ludności sąsiadującej z elementami energetycznymi). Wyniki tych badań spowodowały, że Międzynarodowa Agencja Badań Nad Rakiem uznała, że pola magnetyczne w zakresie ELF, czyli w zakresie skrajnie niskiej częstotliwości, są „przypuszczalnie rakotwórcze” [6].

W sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne zostały określone wytyczne dotyczące rozpoznawania obiektów emitujących pole elektromagnetyczne. Określono przy tym miary niezbędne do oceny oddziaływania pola na organizm człowieka. Wyznaczono także limity, aby zapobiegać zagrożeniom z udziałem promieniowania elektromagnetycznego. Zostały ustalone również bezpośrednie skutki biofizyczne w organizmie człowieka (skutki termiczne – ogrzanie tkanki przez pochłoniętą energię pola, oraz skutki pozatermiczne – mające wpływ na zdrowie psychiczne lub fizyczne przez pobudzenie mięśni, nerwów lub narządów zmysłów). Ponadto omówione zostały prądy kończynowe indukowane (prądy pojemnościowe indukowane bezpośrednio w organizmie i przepływające w kończynach). Ustalono również najwyższe dopuszczalne natężenie pola elektromagnetycznego oraz przedział częstotliwości [6, 7].

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego nie jest odczuwane zmysłami. Bezpośrednia percepcja pola elektromagnetycznego może wystąpić, kiedy człowiek przebywa w silnych polach magnetycznych lub elektrycznych małych częstotliwości, co może wywołać wrażenia wzrokowe. Ponadto poruszanie się w polu magnetostatycznym wywołuje przepływ w organizmie prądów zaindukowanych i może powodować m.in. zawroty głowy, nudności i utrudnioną koordynację wzrokowo-ruchową. Ustają one po oddaleniu się od źródła pola

magnetostatycznego i mają nieustalony dotychczas wpływ na stan zdrowia przy narażeniu wieloletnim, natomiast mogą istotnie ograniczać zdolność do wykonywania precyzyjnej pracy [9, 10].

Skutkiem oddziaływania pola elektromagnetycznego mogą być niepożądane zmiany funkcjonowania organizmu. Badania naukowe wskazują, że do możliwych odległych skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego, szczególnie w przypadku silnych narażeń, należy zaliczyć: zaburzenia układu nerwowego i sercowo-naczyniowego oraz odpornościowego, procesy nowotworowe oraz dolegliwości subiektywne, takie jak bóle głowy, zmęczenie, i zaburzenia pamięci [8].

Problemem dotyczącym negatywnego wpływu pola elektromagnetycznego na zdrowie jest fakt, że oddziaływanie PEM wiąże się z długim okresem opóźnienia. Skutki mogą być widoczne dopiero po 20/30 latach. Rozwój raka mózgu może zająć nawet 40 lat [11, 12].

4. Pole elektromagnetyczne niskiej częstotliwości

Niska częstotliwość (LF) oznacza zmienne w czasie pola elektryczne i magnetyczne o niskiej częstotliwości, które obejmują zakres częstotliwości od 1 Hz do 100 kHz. Pola LF mają dwie składowe: pole elektryczne spowodowane ładunkiem elektrycznym i powiązane pole magnetyczne. Pola magnetyczne występują tylko wtedy, gdy płynie prąd elektryczny. Składnik elektryczny jest mierzony w woltach na metr (V/m). Składnik magnetyczny jest mierzony w amperach na metr (A/m) i wyrażany jako gęstość strumienia w teslach (T) lub w niektórych krajach w gausach (G). Pola LF są związane głównie z zasilaniem energią elektryczną przez wytwarzanie, dystrybucję i wykorzystanie prądu przemiennego (AC). Częstotliwość używana do tego celu wynosi zwykle 50 lub 60 Hz, w zależności od kraju. Ludzie są narażeni na pola LF wokół urządzeń elektrycznych i elektronicznych, głównie w domu oraz w pracy. Linie energetyczne są również źródłem pól LF.

Narażenie na pola LF powoduje, że wewnątrz ciała generowane są pola elektryczne i prądy, które mogą zakłócać własne pola elektryczne i przepływy prądu w ciele związane z normalnym funkcjonowaniem biologicznym. Ponadto pole elektryczne LF oddziałuje z ładunkiem powierzchniowym ciała. Przy niskich poziomach interakcje te pozostają w większości niezauważone i nie zagrażają zdrowiu. Powyżej pewnego poziomu ekspozycji, zwanego progiem, indukowane pola wewnętrzne wywołują skutki dla komórek pobudliwych w ciele, takie jak słabe migotanie światła na obrzeżach pola widzenia lub pobudzenie nerwów i mięśni odczuwane jako uczucie mrowienia. Efekty te występują przy różnych progach w zależności od częstotliwości pola. Przy wyższych poziomach LF powoduje nieodwracalne skutki sercowo-naczyniowe lub oparzenia tkanek [10, 11, 13].

Badania epidemiologiczne sugerują, że długotrwała ekspozycja na pola magnetyczne o częstotliwości 50-60 Hz może być związana ze zwiększonym ryzykiem białaczki u dzieci oraz z możliwością zachorowania na raka u dorosłych. Nie ma istotnych dowodów naukowych na związek między ekspozycją na LF a chorobą Parkinsona, stwardnieniem rozsianym, wpływem na rozwój i rozrodczość oraz chorobami sercowo-naczyniowymi, podczas gdy w przypadku choroby Alzheimera i stwardnienia zanikowego bocznego dowody nie są rozstrzygające. Badania objawów, jakości snu, funkcji poznawczych nie dostarczyły spójnych dowodów na wpływ tego rodzaju narażenia [14, 15, 16].

5. Hulajnogi elektryczne

Hulajnoga elektryczna jest to pojazd napędzany elektrycznie, dwuosiowy, z kierownicą, bez siedzenia i pedałów, konstrukcyjnie przeznaczony do poruszania się wyłącznie przez kierującego znajdującego się na tym pojeździe. Kierujący hulajnogą elektryczną jest obowiązany korzystać z jezdni, po której ruch pojazdów jest dozwolony z prędkością nie większą niż 30 km/h. W przypadku gdy brakuje wydzielonej drogi lub pasa ruchu dla rowerów, może korzystać z chodnika lub drogi dla pieszych, jest jednak zobowiązany wtedy jechać z prędkością zbliżoną do prędkości pieszego.

Hulajnoga elektryczna ma silnik elektryczny, który umożliwia uzyskanie prędkości maksymalnej do średnio 25 km/h. Istnieją jednak egzemplarze mogące osiągnąć jeszcze większą prędkość maksymalną. Zasięg maksymalny wynosi około 40 km [17].



Rys. 1. Hulajnoga elektryczna Xiaomi Mi Electric Scooter Pro 2

Fig. 1. Xiaomi Mi Electric Scooter Pro 2 electric scooter

Źródło: <https://www.x-kom.pl/p/598624-hulajnoga-elektryczna-xiaomi-mi-pro-2-uvex-filnal-visor.html>

Przedmiotem badań jest hulajnoga elektryczna Xiaomi Mi Electric Scooter Pro 2. Hulajnoga ta ma silnik o mocy znamionowej 300 W oraz mocy maksymalnej 600 W. Możliwe jest rozwinięcie prędkości do 25 km/h przy obciążeniu wynoszącym do 100 kilogramów. Hulajnoga potrafi wjechać na zbrocza o nachyleniu do 20%. W hulajnodze wbudowana jest bateria o pojemności 12 800 mAh, co pozwala na przejechanie 45 km na jednym ładowaniu. Za pomocą aplikacji mobilnej można ustawić poziom odzyskiwania energii podczas jazdy i hamowania [18].

Tabela 1

Dane techniczne hulajnogi Xiaomi PRO 2

Cecha	Wartość
Moc silnika [W]	300
Maksymalna moc silnika [W]	600
Średnica kół [cal]	8,5
Ciśnienie w oponach przód [bar]	2,4 – 2,7
Ciśnienie w oponach tył [bar]	2,7 – 3,4
Maksymalna prędkość [km/h]	25
Zasięg [km]	45
Czas ładowania [h]	9
Pojemność baterii [Ah]	12,8
Napięcie baterii [V]	37
Zasilanie	Akumulator
Hamulec przedni	Elektryczny
Hamulec tylny	Tarczowy
Amortyzacja	Brak
Waga [kg]	14,2

Źródło: Instrukcja obsługi urządzenia

Tabela 2

Dane techniczne ładowarki do hulajnóg elektrycznych

Cecha	Wartość
Wejście	100-240 V – 50/60 Hz 2.0 A MAX
Wyjście	42V, 1.7A

Źródło: Instrukcja obsługi urządzenia

6. Badania pola elektromagnetycznego emitowanego przez hulajnogę elektryczną

W ramach badań postanowiono zmierzyć: indukcję magnetyczną, natężenie pola elektrycznego, natężenie pola magnetycznego oraz gęstość mocy, emitowane przez hulajnogę elektryczną. Pomiary zostały przeprowadzone w trakcie, gdy hulajnoga była włączona, oraz podczas ładowania:

- przy ładowarce,
- przy gnieździe ładowania,
- przy baterii,
- przy silniku elektrycznym.

Pomiary przeprowadzono z użyciem miernika pola elektromagnetycznego Benetech GM3120. Miernik pracuje w zakresie częstotliwości od 5 Hz do 3500 MHz. W tabeli 3 przedstawiono parametry techniczne miernika, a urządzenie pomiarowe pokazano na rysunku 3.



Rys. 2. Miernik pola elektromagnetycznego Benetech GM3120

Fig. 2. Benetech GM3120 electromagnetic field meter

Źródło: <https://botland.com.pl/urządzenia-pomiarowe>

Parametry techniczne miernika elektromagnetycznego Benetech GM3120

Cecha	Wartość
Mierzone pole	Pole elektryczne o niskiej częstotliwości (ELF) 5 Hz ~ 3500 MHz
Metoda pomiaru	Sensor jednoosiowy
Pomiary	Dla częstotliwości 5 Hz ~ 3500 MHz
E (pole elektryczne)	1 V/m-1999 V/m
H (pole magnetyczne)	0,01 μ T-19,99 μ T
S (gęstość mocy)	-
Zakresy dynamiki	-
Dokładność	do 1 V/m – pole elektryczne do 0,01 μ T – pole magnetyczne
Czas próbkowania	0,4 sekundy
Pomiar X, Y, Z	-
Wysokość progu alarmu	40 V/m (pole elektryczne) / 0.4 μ T (pole magnetyczne)

Zródło:[<https://botland.com.pl/urządzenia-pomiarowe>]

6.1. Pomiar natężenia pola elektrycznego

Pomiary natężenia pola elektrycznego wykonano miernikiem Benetech GM3120 działającym w zakresie częstotliwości 5 Hz ~ 3500 MHz. Przed rozpoczęciem badania zmierzono wartości tła w pomieszczeniu pomiarowym, a wynosiło ono 0 ± 1 V/m. Za każdym razem wykonano 10 pomiarów. Badania przeprowadzono bezpośrednio przy urządzeniu oraz w odległościach 0,2 m i 0,5 m. Poniżej przedstawione zostały rezultaty badań jako średnia wykonanych pomiarów w formie tabelarycznej (tabele 4-6).

Tabela 4

Uzyskane wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego – bezpośrednio

Miejsce pomiaru	Odległość	Pole elektryczne [V/m] (tło: 0,00 V/m)
Ładowarka	bezpośrednio	832,8
Gniazdo ładowania	bezpośrednio	419,4
Bateria	bezpośrednio	812,7
Silnik elektryczny	bezpośrednio	967,1

Tabela 5

Uzyskane wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego – 0,2 m

Miejsce pomiaru	Odległość	Pole elektryczne [V/m] (tło: 0,00 V/m)
Ładowarka	0,2 m	149,8
Gniazdo ładowania	0,2 m	134,7
Bateria	0,2 m	256,3
Silnik elektryczny	0,2 m	146,4

Tabela 6

Uzyskane wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego – 0,5 m

Miejsce pomiaru	Odległość	Pole elektryczne [V/m] (tło: 0,00 V/m)
Ładowarka	0,5 m	17,4
Gniazdo ładowania	0,5 m	1,5
Bateria	0,5 m	30,9
Silnik elektryczny	0,5 m	14,5

Zródło: badania własne

Po przeprowadzonych badaniach natężenia pola elektrycznego można stwierdzić, że największe pole wytwarzane jest przez ładowarkę oraz silnik elektryczny hulajnogi, chociaż w dużym stopniu można zauważyć też pole elektryczne w obszarze baterii i gniazda ładowania. Wartości te są duże bezpośrednio przy urządzeniu, przy oddalaniu się od źródła zaczynają się one zmniejszać. Dopuszczalne wartości parametrów dla badanych częstotliwości według ustawy Dz.U. 2019 poz. 2448 nie powinny przekraczać 1000 V/m dla miejsc przebywania ludności, więc emisja natężenia pola elektrycznego przez hulajnogę oraz ładowarkę spełniają normę bezpieczeństwa, jednak chwilami wartości mierzone były bardzo blisko wartości granicznych.

7. Interpretacja wyników i podsumowanie

1 stycznia 2020 r. weszło w życie Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku. Tym samym zmieniło ono treść Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów utrzymania tych poziomów w części dotyczącej wartości granicznych oddziaływania pól elektromagnetycznych.

Wyniki badania pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez hulajnogę elektryczną oraz ładowarkę wynoszą dużo mniej niż wartość dopuszczalna, jednak bezpośrednio przy urządzeniach wartości te są duże. Wyniki te nie przekraczały wartości określonych jako dopuszczalne ze względu na ochroną zdrowia i życia pracowników, które zostały określone w ustawie Dz.U. 2019 poz. 2448 [12, 13]. Wykazuje to, że użytkowanie hulajnogi elektrycznej oraz przebywanie w pewnej odległości (0,5 m) podczas ładowania jest bezpieczne, lecz przebywanie w bezpośrednim otoczeniu może powodować dolegliwości takie jak bóle głowy czy też zaburzenia koncentracji.

Pomimo tak optymistycznych wyników badań należy zauważyć, jak ważną kwestią jest wiedza na temat szkodliwego oddziaływania pola elektromagnetycznego.

Bibliografia

1. Rączkowski B. (2012). BHP w praktyce, wydanie XIV. Ośrodek doradztwa i doskonalenia kadr Sp. z o.o, Gdańsk.
2. Koradecka D. (2008). Bezpieczeństwo i higiena pracy. CIOP, Warszawa.
3. Augustyńska D, Pośniak M. (2003). Czynniki szkodliwe w środowisku pracy wartości dopuszczalne. CIOP, Warszawa.
4. Aniołczyk H., Bartkiewicz A., Gadzicka E., Gryz K. i inni (2000). Pole elektromagnetyczne źródła – oddziaływanie – ochrona. Instytut medycyny pracy im. prof. J. Nofera, Łódź.
5. <http://szkodliwepromieniowanie.pl/widmo-elektromagnetyczne-zrodel-promieniowania/> [dostęp: 25.04.2018].
6. https://www.prawo.pl/kadry/jak-pola-elektromagnetyczne-wplywaja-na-zdrowie,189331.html?fbclid=IwAR0qxtGO1uX7O7wMGX7ambVw48kob0uagqA-1KXrV_wpJd4sYWpwINOpLFk
7. Mercola J.: Pole elektromagnetyczne EMF. Wydawnictwo Vital, Białystok 2020. ISBN 978-83-8168-587-0.
8. <https://www.icnirp.org> [dostęp: 9.12.2022 r.].
9. Gazda-Grzywacz M., Burchart-Korol D., Smoliński A., Zarębska K.: Environmental protection – greenhouse gas emissions from electricity production in Poland. Journal of Physics: Conference Series, III Alternative Fuels Forum, 1398 (2019) 012004, DOI:10.1088/1742-6596/1398/1/012004.

10. Burchart-Korol D.: Environmental aspects of electromobility development in the Visegrad Group countries. WU T Journal of Transport Engineering, vol. 128, 2020, ISSN 1230-9265, DOI: 10.5604/01.3001.0014.0903.
11. Wartenberg D., Residential Magnetic Fields and Childhood Leukemia: a Me-ta-Analysis, „American Journal of Public Health” 88, no. 12 (1998): 1787-1794, DOI:10.2105/ajph.88.12.1787.
12. Zmysłony M. (2006). Biofizyczne mechanizmy działania pól elektromagnetycznych a skutki zdrowotne. Medycyna Pracy, nr 1.
13. <https://www.czyleko.pl/narazenie-na-pole-elektromagnetyczne-a-zdrowie-czlowieka/?fbclid=IwAR1bOukmbcJdAAk9sGlttfpydk49bE5MtI8CNuJ2ncepIBTXS4xLlfzke8o>
14. Rączkowski B., BHP w Praktyce, ODDK, Gdańsk 2016; „Efekty biologiczne indukowane oddziaływaniem pola elektromagnetycznego” J. Kaszuba-Zwoińska, J. Gremba, B. Gałdzińska-Calik, K. Wójcik-Piotrowicz, P.J. Thor, Przegląd Lekarski, nr 2015/72/11.
15. PN-T-06580-1:2002 – Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym o częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz – Część 1: Terminologia.
16. PN-T-06580-3:2002 – Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym o częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz – Część 3: Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy.
17. <https://smartride.pl/elektryczna-hulajnoga-parametry-techniczne-wyjasniamy-ich-znaczenie/>
18. <https://mi-home.pl/mi-electric-scooter-pro-2>

EMISJA POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI PRZEZ HULAJNOGI ELEKTRYCZNE

Streszczenie

W obecnych czasach niemal wszędzie spotyka się z urządzeniami zasilane energią elektryczną, stale zwiększa się również liczba użytkowników sprzętów elektronicznych, między innymi hulajnóg elektrycznych. Urządzenia te są źródłami promieniowania elektromagnetycznego. Częstym tematem do dyskusji jest więc wpływ pola elektromagnetycznego na zdrowie człowieka. Pole elektromagnetyczne niskiej częstotliwości (LF) oznacza zmienne w czasie pola elektryczne i magnetyczne o niskiej częstotliwości, które obejmują zakres częstotliwości od 1 Hz do 100 kHz. Pola LF mają dwie składowe: pole elektryczne spowodowane ładunkiem elektrycznym i powiązane pole magnetyczne. Pole elektromagnetyczne w zależności od wielkości natężenia oraz od częstotliwości może powodować różne dolegliwości u osób mających częsty kontakt z urządzeniami elektronicznymi. Bezpośrednie działanie pola elektromagnetycznego powoduje skupienie się sił linii pola w organizmie przez zwiększenie się parametrów wartości elektrycznych tkanek w stosunku do powietrza. Powoduje to przepływ

prądów, które, gdy uzyskają odpowiednio wysoką wartość, mogą oddziaływać w organizmie człowieka na system nerwowy, a ponadto wydzielone ciepło podnosi dodatkowo temperaturę tkanek. Ze względu na rosnącą liczbę użytkowników hulajnóg elektrycznych wydaje się konieczne zbadanie emisji pola elektromagnetycznego przez to urządzenie. Spora liczba osób przechowuje oraz ładuje swoje hulajnogi elektryczne w domu, więc ma bezpośredni kontakt z polem elektromagnetycznym wytwarzanym przez to urządzenie oraz jego ładowarkę. W niniejszym artykule dokonano pomiarów pola elektromagnetycznego niskiej częstotliwości emitowanego przez hulajnogę elektryczną oraz ładowarkę. Pomiary zostały wykonane przy włączonej hulajnodze oraz podczas ładowania.

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, niska częstotliwość, hulajnoga elektryczna, elektromobilność

EMISSION OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD BY ELECTRIC SCOOTERS

Abstract

Nowadays, there are devices powered by electricity almost everywhere, and the number of users of electronic devices, including electric scooters, is constantly increasing. These devices are sources of electromagnetic radiation. Therefore, a frequent topic for discussion is the impact of the electromagnetic field on human health. Low-frequency (LF) electromagnetic field refers to low-frequency time-varying electric and magnetic fields that cover the frequency range of 1 Hz to 100 kHz. LF fields have two components: an electric field due to an electric charge and an associated magnetic field. The electromagnetic field, depending on the intensity and frequency, can cause various ailments in people who have frequent contact with electronic devices. The direct action of the electromagnetic field causes the concentration of field lines in the body by increasing the parameters of the electrical values of tissues in relation to air. This causes the flow of currents, which, when they reach a sufficiently high value, can affect the nervous system in the human body, and the released heat additionally increases the temperature of the tissues. Due to the growing number of users of electric scooters, it seems necessary to test the emission of the electromagnetic field by this device. A large number of people store and charge their electric scooters at home, so they have direct contact with the electromagnetic field generated by this device and its charger. In this article, measurements of the low-frequency electromagnetic field emitted by an electric scooter and a charger were made. Measurements were taken with the scooter turned on and while charging.

Keywords: electromagnetic field, low frequency, electric scooter, electromobility

Mohsen DEHBASHI¹, Anna KAŻMIERCZAK-BALATA², Wiktoria SZYMSKA³,
Jerzy BODZENTA⁴

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SAMPLE GEOMETRY ON THE ACCURACY OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY MEASUREMENTS USING THE FOUR-POINT PROBE METHOD

1. Introduction

In recent years, the miniaturization and integration of electronic devices have become increasingly important, which has led to a growing interest in the measurement of electrical conductivity of thin layers. The need for accurate and reliable methods for measuring the electrical conductivity of materials with thicknesses ranging from a few nanometers to several micrometers has become a critical requirement for the design and development of advanced electronic devices.

One of the commonly used techniques for measuring the electrical properties of thin layers is the van der Pauw four-probe method, which has been widely adopted by researchers worldwide [1-3]. The van der Pauw method is a well-established technique that can accurately measure the electrical conductivity and Hall coefficient of thin layers with arbitrary shape and thickness. The method relies on the measurement of voltage and current through four contacts arranged in a specific geometric pattern at the perimeter of the sample. A considerable body of literature has demonstrated the efficacy of the van der Pauw method in characterizing a wide range of materials, including semiconductors [4] and metals [5]. Researchers have leveraged this method to gain valuable insights into the electrical properties of thin films and to study the behavior of electronic devices under varying operating conditions.

Despite its popularity, it is essential to consider the influence of geometry factors, such as sample shape and size, on resistivity measurements when using the van der Pauw method. These factors can have a significant impact on the accuracy and reliability of measurements.

¹ Mohsen.Dehbashi@polsl.pl, Zakład Fizyki Stosowanej, Instytut Fizyki CND, Politechnika Śląska

² Anna.Kazmierczak-Balata@polsl.pl, Zakład Fizyki Stosowanej, Instytut Fizyki CND, Politechnika Śląska

³ Wiktszy698@student.polsl.pl, Wydział Automatyki, Elektroniki i Automatyki, Politechnika Śląska

⁴ Jerzy.Bodzenta@polsl.pl, Zakład Fizyki Stosowanej, Instytut Fizyki CND, Politechnika Śląska

Therefore, meticulous consideration of these factors is crucial for the precise application of the van der Pauw method in electrical conductivity measurements.

Several studies have investigated the accuracy and reliability of electrical conductivity measurements using the van der Pauw method by considering various factors such as sample size, thickness, probe geometry, and probe position. For instance, Kasl et al. investigated the effect of probe position and sample thickness on the accuracy of resistivity measurements [6]. They demonstrated that the accuracy of the method can be improved by placing contacts across the edges of thick samples. The results demonstrate that reliable resistivity measurements can be achieved with thickness to diameter ratios above unity.

More recently, papers describing four-point probe methods with contacts arranged along a straight line or at the vertices of a rectangular (square) were published. The main difference between these techniques and “classical” van der Pauw method, where the contacts have to be at the perimeter, is that standard, commercially available, probes can be used (e.g. [7]). In a review paper [8] Miccoli et al. showed a theoretical background for electric resistivity measurements with arbitrary organized four-point contact placed on a surface of semi-infinite sample or infinite thin sheet. They also reviewed various correction factors that are necessary for accurate derivation of resistivity from measured resistance, including sample thickness, dimensionality, anisotropy, and relative size and geometry of the sample with respect to the contact assembly. They showed that the accuracy of the method is highly sensitive to the position of the probes, and that the use of a correction factor can significantly improve the accuracy of measurements.

Overall, these studies highlight the importance of careful consideration of various factors in order to obtain accurate and reliable electrical conductivity measurements using the four-point probe method. In this article, we will give an overview of the four-point probe method, explaining its theoretical background and numerical analysis. Additionally, we aim to investigate the influence of sample geometry on the accuracy of electrical conductivity measurements. The results demonstrate good agreement between the simulated and assumed electrical conductivity for both 2D and 3D limits, indicating that the model can be used to simulate measurements on samples of any shape. Additionally, we provide limits for the use of 2D and 3D models for real samples, which can guide researchers in selecting the appropriate model for their specific sample geometry.

2. Theoretical Background

Let us assume the four-point probe array as shown in Figure 1. A measurement consists in determination of the voltage V across two adjacent contacts, while a current I flows through the

other two contacts. In a case of semi-infinite, isotropic sample, this voltage is given by the equation:

$$V_{3D} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2} \right) - \left(\frac{1}{s_3} - \frac{1}{s_4} \right) \right], \quad (1)$$

where ρ is the sample resistivity. An analogous equation for infinite, isotropic thin sheet is:

$$V_{2D} = \frac{I\rho}{2\pi d} \ln \left(\frac{s_2 s_3}{s_1 s_4} \right), \quad (2)$$

where d is the sheet thickness.

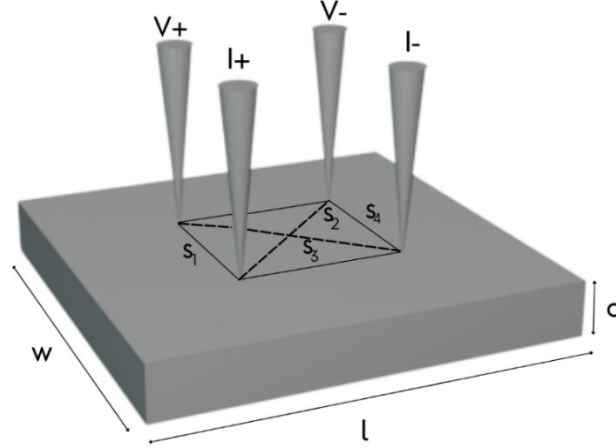


Fig. 1. Schematic of a four-point probe array
Rys. 1. Schemat sondy czterostrzowej

For the electrodes placed at vertices of side s square, $s_1 = s_4 = s$ and $s_2 = s_3 = \sqrt{2}s$. These substitutions lead to the following formulas:

$$R_{3D} = \frac{V_{3D}}{I} = \frac{(2-\sqrt{2})\rho}{2\pi s}, \quad (3)$$

$$R_{2D} = \frac{V_{2D}}{I} = \frac{\rho \ln 2}{2\pi d}, \quad (4)$$

R in Equations (3) and (4) is not a classical resistance, as V is not measured on current contacts. However, this quantity is proportional to the sample resistivity ρ and is called electrical resistance in the paper. These equations can be used for determining the sample electric resistivity ρ or conductivity $\sigma = 1/\rho$ from measurements.

This methodology provides an accurate and efficient means of measuring material. The added benefit is a smaller required area compared to the in-line contact configuration.

3. Numerical analysis

In this section, we present the numerical results and discussion of our investigation into the influence of sample geometry on the accuracy of electrical conductivity calculations using the four-probe method. We begin by providing a visual representation of the experimental setup

model with equally spaced probes in a square configuration, as shown in Figure 2. All simulations were carried out for side L square sample of thickness d . The model was built in COMSOL Multiphysics™ using Electrical and Thermal Modules.

Figure 3 illustrates the distribution of electrical potential on the sample's surface, with contacts A and B serving as the current-carrying contacts and contacts C and D as the voltage-sensing ones. These figures provide important context for our subsequent analysis of the impact of sample geometry on electrical conductivity measurements.

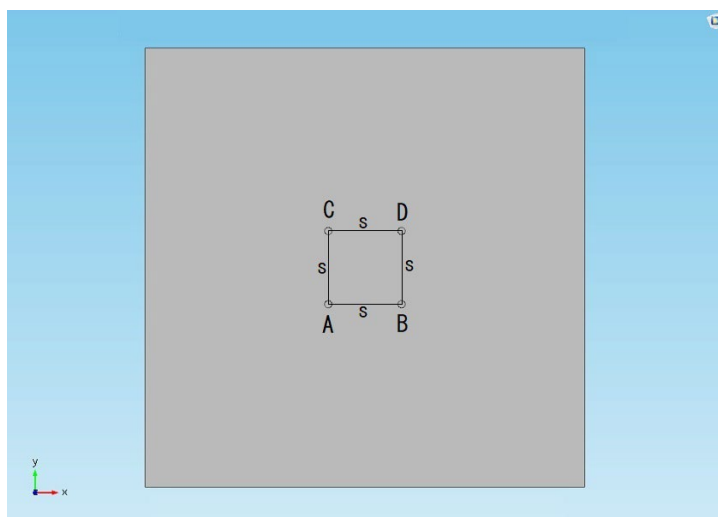


Fig. 2. Four-point probe array in a square configuration for measuring electrical resistivity of materials. The contact are placed on a sample surface. The adjacent contacts' spacing is s
 Rys. 2. Układ sondy czteroostrowej do pomiaru oporności właściwej materiałów w konfiguracji kwadratu. Sondę umieszcza się na powierzchni próbki. Sąsiednie kontakty są w odległości s

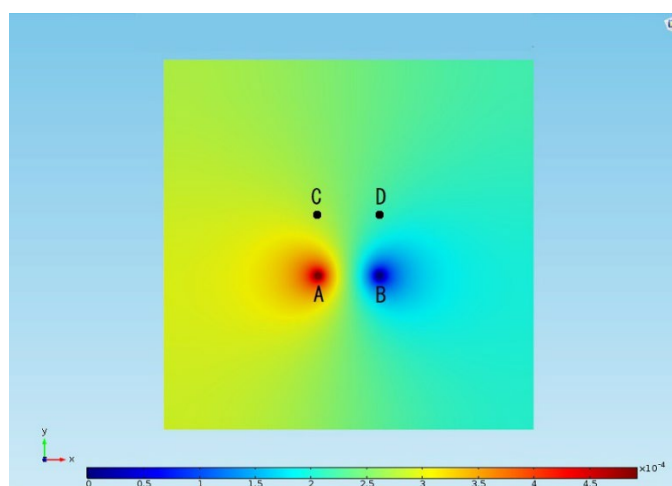


Fig. 3. Distribution of electrical potential on the sample surface while the electric current is flowing through the contacts A and B. The contact B is grounded
 Rys. 3. Rozkład potencjału elektrycznego na powierzchni próbki podczas przepływu prądu przez kontakty A i B. Kontakt B jest uziemiony

Figure 4 demonstrates that the samples under study exhibit linear $V(I)$ characteristics, indicating ohmic behaviour. This linearity is important for accurate calculation of the electrical conductivity of the samples.

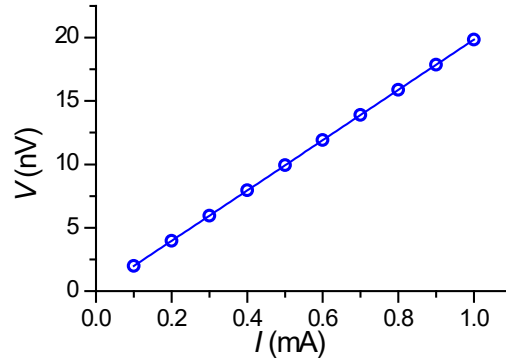


Fig. 4. Simulated voltage-current characteristic in four-point probe measurement
Rys. 4. Wynik symulacji zależności napięcia od prądu w pomiarze sondą czterostrzową

Figure 5 shows changes in R vs. σ , where the resistance R was determined from the $V-I$ curve. In a log-log graph of R vs. σ , the slope of the graph is -1, indicating an inverse proportionality between R and σ . With a change in sample size or probe spacing, the measured resistance also changes, resulting in a parallel shift of the R vs. σ log-log graph. Therefore, it is important to carefully control the geometry of the measurement system to obtain accurate and reproducible results.

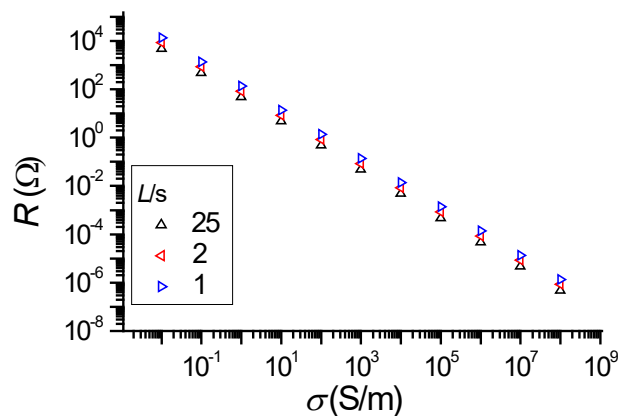


Fig. 5. Electrical resistivity dependence on electrical conductivity
Rys. 5. Zależność rezystancji od przewodności elektrycznej

Figure 6a shows the normalized resistance as a function of L/s , while Figure 6b shows the normalized resistance as a function of d/s . The normalization was done for the biggest sample ($L/s = 25$, and $d/s = 12.5$).

Both figures demonstrate that the relationship between normalized resistance and the geometry of the parameter describing geometry of the system is independent of the electrical

conductivity of the sample. This is an important observation, as it implies that the dependence of the normalized resistance on the geometry of the system can be understood and accounted for, regardless of the electrical conductivity of the sample being measured.

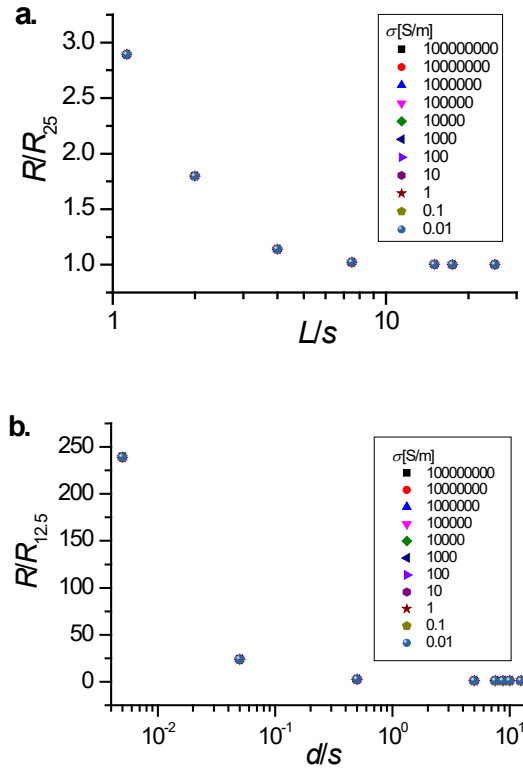


Fig. 6. Normalized electrical resistance as a function of L/s (a.), and d/s (b.)
Rys. 6. Unormowana rezystancja elektryczna w funkcji L/s (a.) i d/s (b.)

4. Limits of analytical formulas

In the field of electrical conductivity measurements, analytical formulas have long been used to calculate the electrical conductivity of a sample based on various parameters, such as the dimensions of the sample and the spacing between the probes. However, it is important to note that these formulas are based on simplifying assumptions and idealized geometries, which may not accurately represent the real-world conditions of the sample being measured. Therefore, it is crucial to investigate the limitations of analytical formulas to determine the conditions under which more complex numerical models or experimental measurements are required to obtain accurate results.

This section aims to explore the boundaries beyond which the analytical formulas may no longer be valid for accurately determining the electrical conductivity of 2D and 3D samples. By examining these limits, the study aims to provide a more complete understanding of

the capabilities and limitations of the electrical conductivity measurement techniques. This will help researchers to identify the optimal conditions for conducting electrical conductivity measurements, and to select the appropriate measurement technique based on the specific sample geometry.

To investigate the limitations of analytical formulas, the study will explore a range of sample geometries and dimensions, and compare the results obtained using analytical formulas with those obtained using more complex numerical models. This will help to identify the conditions under which analytical formulas are valid, and the conditions under which they may no longer provide accurate results.

Using Equations 3 and 4, it is possible to obtain an expression for the electrical conductivity of the sample:

$$\sigma_{R_3D} = \frac{2-\sqrt{2}}{2\pi R s'} \quad (5)$$

$$\sigma_{R_2D} = \frac{\ln 2}{2\pi R d} \quad (6)$$

in 3D and 2D approximations, respectively. An error for electrical conductivity can be defined as the difference between the simulated electrical conductivity and the assumed electrical conductivity of the sample. This error can be expressed as a percentage of the true value and is commonly referred to as the relative error:

$$\delta\sigma = 1 - \frac{\sigma_R}{\sigma_{\text{assumed}}} \quad (7)$$

A maximum acceptable relative error can be specified based on the requirements of the experiment or the application. For example, if a relative error of no more than 5% is acceptable, the measurement technique must be capable of achieving this level of accuracy.

Let us evaluate these errors as a function of the geometry of the sample (Figure 7). The geometry of the sample can have a significant impact on the accuracy of the electrical conductivity measurement. Figure 7 shows the variation in errors observed in electrical conductivity as a function of the ratio between the sample thickness d and the probe spacing s for a fixed value of $L/s = 15$. To ensure accurate measurements in the determination of conductivity σ , it is necessary to consider the ratio of the sample thickness d to the probe spacing s . The maximum relative error in conductivity determination should not exceed 5%, which imposes certain conditions on the values of d/s for both 3D and 2D models. For a 3D model, where the sample thickness is not significant, d/s should be greater than 2. In this limit the electrical potential distribution around a single current contact has spherical symmetry. On the other hand, for a 2D model where the sample thickness influences measurements, d/s should be less than 0.6. This is because the measurement is more sensitive to the sample shape and size in 2D case, and a smaller ratio of d/s ensures that the potential distribution around single current contact has cylindrical symmetry.

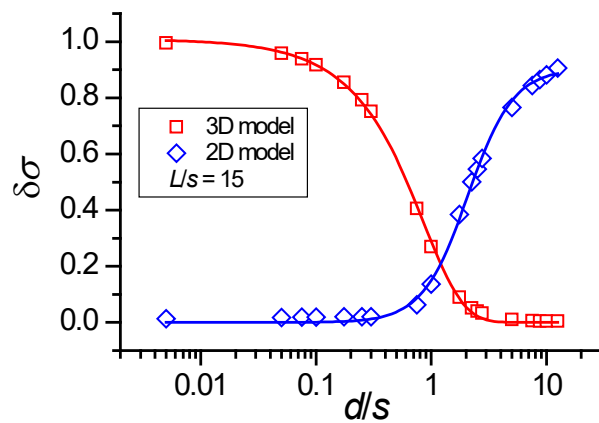


Fig. 7. Effect of sample thickness on electrical conductivity determination
Rys. 7. Wpływ grubości próbki na wyznaczenie przewodności elektrycznej

Figure 8 shows that the accuracy of electrical conductivity measurements can be impacted by the presence of sample edges. In the case of a rectangular sample with probes positioned in the centre, the ratio of the sample length L to the probe spacing s plays a crucial role in determining the accuracy of the measurement. For a 3D model and the probe at the centre of the sample, a ratio of L/s greater than 6 is required for accurate measurements. The simulations were done for d/s value equal to 5. Similarly, for a 2D model and the probe at the centre of the sample, a ratio of L/s greater than 9.5 is required for accurate measurements. In this case, the value of d/s was equal to 0.05. These conditions ensure that the contribution of the sample edges to the measurement is minimized, resulting in more accurate results.

To summarize, careful consideration of probe spacing ratios, sample thickness, and sample edges is necessary to obtain accurate electrical conductivity measurements. For a rectangular sample with probes positioned in the center, it is crucial to adhere to the recommended d/s and L/s ratios to minimize the influence of sample geometry and ensure accurate results.

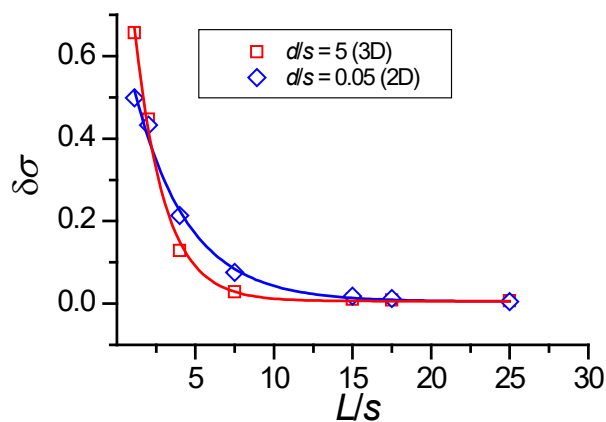


Fig. 8. Effect of sample size on electrical conductivity determination
Rys. 8. Wpływ wielkości próbki na wyznaczenie przewodności elektrycznej

5. Conclusions

The study demonstrates the importance of careful consideration of various factors when conducting electrical conductivity measurements. By following the recommended ratios for probe spacing, sample thickness, and sample edges, researchers can obtain accurate and reliable results that can be used to inform their research.

Furthermore, the study highlights the effectiveness and versatility of numerical simulations in analyzing electrical conductivity measurements. The good agreement between the calculated and assumed electrical conductivity values in both 2D and 3D limits suggests that numerical simulations can be used to simulate measurements on samples of any shape, providing researchers with more flexibility in conducting experiments.

The study also provides guidance on the limits for using 2D and 3D models for real samples, which can help researchers select the appropriate model for their specific sample geometry. This can save time and resources by avoiding unnecessary simulations and experiments that may not provide useful results.

Looking towards the future, the analysis of experiments with AC current in a square four-point probe configuration is a promising area of research. This technique has the potential to provide simultaneous measurements of both the electrical conductivity and the dielectric constant, providing a more comprehensive understanding of the sample's electrical properties. This could lead to new insights and applications in various fields, including materials science, electronics, and energy storage.

References

1. Oliveira F.S., Cipriano R.B., da Silva F.T., Romão E.C. and dos Santos C.A.M., Simple analytical method for determining electrical resistivity and sheet resistance using the van der Pauw procedure, *Scientific Reports* 10, 16379 (2020).
2. Lim S.H.N., McKenzie D.R., Bilek M.M.M., Van der Pauw method for measuring resistivity of a plane sample with distant boundaries, *Review of Scientific Instruments* 80, 075109 (2009).
3. Ausserlechner U., Closed form expressions for sheet resistance and mobility from van der-Pauw measurement on 90° symmetric devices with four arbitrary contacts, *Solid-State Electronics* 116, 46 (2016).
4. Patrick M. Hemenger, Measurement of High Resistivity Semiconductors Using the van der Pauw Method, *Review of Scientific Instruments* 44, 698 (1973).

5. Bazilchuk M., Evenstad O.M., Zhang Zh., Kristiansen H., He J., Resistance Analysis of Spherical Metal Thin Films Combining Van Der Pauw and Electromechanical Nanoindentation Methods, *Journal of Electronic Materials*, 47, 6378 (2018).
6. Kasl C., Hoch M.J.R., Effects of sample thickness on the van der Pauw technique for resistivity measurements, *Review of Scientific Instruments* 76, 033907 (2005).
7. See <http://www.fourpointprobes.com/jandel-four-point-probe-heads/> for four-point probe heads
8. Miccoli I., Edler F., Pfnür H., Tegenkamp C., The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems, *Journal of Physics: Condensed Matter* 27, 223201 (2015).

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SAMPLE GEOMETRY ON THE ACCURACY OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY MEASUREMENTS USING THE FOUR-POINT PROBE METHOD

Abstract

The demand for accurate and reliable methods for measuring the electrical conductivity of thin layers has increased with the miniaturization and integration of electronic devices. The van der Pauw method is a well-established technique for measuring the electrical conductivity of thin layers with arbitrary shape and thickness. This method requires four probes placed around the sample perimeter. In this paper, we present an overview of the theoretical background and numerical analysis of the four-probe method utilizing probes placed at the vertices of a square anywhere on the sample surface. We also explore how the accuracy of electrical conductivity measurements is influenced by sample geometry. Our findings demonstrate that the model can be applied to simulate measurements on samples of any shape, with good agreement between simulated and assumed electrical conductivity parameters in both 2D and 3D limits. Additionally, we provide guidelines for researchers on the use of 2D and 3D models for real samples, depending on the sample geometry. Our research highlights the importance of taking various factors, including sample geometry, into account to obtain precise and reliable electrical conductivity measurements using the four-probe method.

Keywords: electrical conductivity, four-point probe, modelling.

SYMULACJE NUMERYCZNE WPLYWU GEOMETRII PRÓBEK NA DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW PRZEWODNICTWA ELEKTRYCZNEGO METODĄ SONDY CZTEROOSTRZOWEJ W KONFIGURACJI KWADRATOWEJ

Streszczenie

W ostatnim czasie wzrosło zapotrzebowanie na dokładne i niezawodne metody pomiaru przewodności elektrycznej cienkich warstw. Jest to związane przede wszystkim z miniaturyzacją i integracją urządzeń elektronicznych. Metoda van der Pauwa jest znaną techniką pomiaru przewodności elektrycznej cienkich warstw o dowolnym kształcie i dowolnej grubości. Wymaga ona jednak czterech kontaktów rozmieszczonych na obwodzie próbki. W niniejszym artykule przedstawiamy przegląd podstaw teoretycznych oraz wyniki symulacji numerycznych pomiaru przewodności elektrycznej metodą czteroostrzową, w której sonda mająca cztery ostrza rozmieszczone w wierzchołkach kwadratu dotyka dowolnego obszaru na powierzchni próbki. W ramach przeprowadzonych symulacji numerycznych badano, jak geometria próbki wpływa na dokładność pomiarów przewodności elektrycznej. Na podstawie uzyskanych wyników możemy stwierdzić, że model można zastosować do symulacji pomiarów przewodności elektrycznej dla próbek o dowolnym kształcie, w geometriach 2D oraz 3D, z dobrą zgodnością wyników symulacji i wejściowych parametrów przewodnictwa elektrycznego. Opracowany przez nas model pozwala uwzględnić wpływ różnych czynników, takich jak geometria próbki, grubość próbki, na wyniki pomiarów przewodności elektrycznej z wykorzystaniem sondy czteroostrzowej.

Słowa kluczowe: przewodność elektryczna, sonda czteroostrzowa, modelowanie

Amadeusz DZIWIS¹

INNOWACYJNE APLIKACJE LASEROWEJ OBRÓBK POWIERZCHNIOWEJ

1. Wstęp

Obecność wad powierzchniowych, takich jak porowatość, pęknięcia, gruboziarnistość struktury czy chropowatość powierzchni, ma ogromny wpływ na własności materiałów. Z tego powodu obróbka powierzchni stała się ważną częścią inżynierii materiałowej mającej za zadanie otrzymać określone własności mechaniczne i powierzchniowe. Zastosowanie obróbki powierzchniowej za pomocą wiązki laserowej powoduje poprawę własności mechanicznych obrabianej powierzchni. Laserowa obróbka powierzchni dzięki zastosowaniu technik komputerowych zapewnia wysoką dokładność modyfikacji wybranych obszarów powierzchni. Przetapianie laserowe powierzchni materiału powoduje wzrost odporności korozyjnej, odporności na ścieranie, wytrzymałości zmęczeniowej, mikrotwardości i wytrzymałości na rozciąganie. W celu otrzymania określonych własności powierzchni w procesie przetapiania konieczny jest odpowiedni dobór parametrów obróbki. Przetapianie laserowe jest nieodłączną częścią wytwarzania wyrobów w procesie druku 3D (wytwarzanie przyrostowe) ze względu na znaczną porowatość oraz pęknięcia.

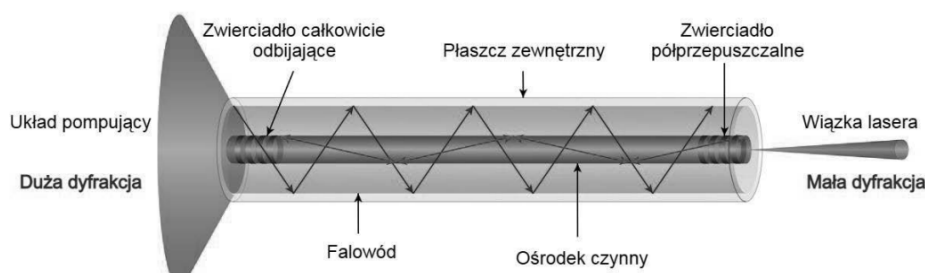
Defekty powierzchniowe, takie jak chropowatość, obecność porów czy grube ziarna, są zwykle główną przyczyną uszkodzeń różnych materiałów. Wady te stanowią miejsca inicjacji pęknięć mogących doprowadzić do zniszczenia materiału. Jakość powierzchni metali i stopów w dużej mierze zależy od parametrów obróbki, tj. prędkości skrawania, posuwu i promienia ostrza narzędzia [1]. Optymalizacja tych parametrów jest niezbędna do otrzymania powierzchni mającej jak najmniejszą liczbę wad powierzchniowych. Wady te mają negatywny wpływ na właściwości mechaniczne metali i stopów. Znaczna liczba tych wad powoduje zmniejszenie wytrzymałości, ciągliwości i wytrzymałości zmęczeniowej [2]. Pory na powierzchni materiałów mają tendencję do zmniejszania ich wytrzymałości na rozciąganie [3]. Awarie w obracających się częściach w dużej mierze występują z powodu naprężeń zmęczeniowych

¹ Amadeusz.Dziwis@polsl.pl, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska.

spowodowanych różnymi obciążeniami. Zniszczenie spowodowane zmęczeniem następuje w trzech etapach, tj. inicjacja pęknięcia, propagacja pęknięcia i zniszczenie. Wyżej wymienione wady poza inicjacją pęknięć negatywnie wpływają na wytrzymałość zmęczeniową materiału [4].

2. Budowa i działanie lasera

Lasery to urządzenia, które wykorzystują zjawisko emisji wymuszonej, dzięki czemu emitują wiązkę promieniowania elektromagnetycznego (rys. 1). Zakres długości fal emitowanych przez laser odpowiada podczerwieni, światłu widzialnemu i ultrafioletowemu [5]. Sam akronim LASER oznacza Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Nazwa podkreśla mechanizm działania lasera, który polega na wykorzystaniu zjawiska wymuszonej emisji promieniowania. Jednak lasery nie tylko wzmacniają światło. Istotą lasera bardziej oddaje coraz rzadziej używany rosyjski akronim OKG – Opticzeskij Kwantowyj Gienierator. Laser potrafi bowiem wytworzyć światło (w drodze emisji wymuszonej) z energii wprowadzonej do ośrodka czynnego różnymi sposobami.



Rys. 1. Schemat budowy lasera [6]

Fig. 1. Scheme of laser construction [6]

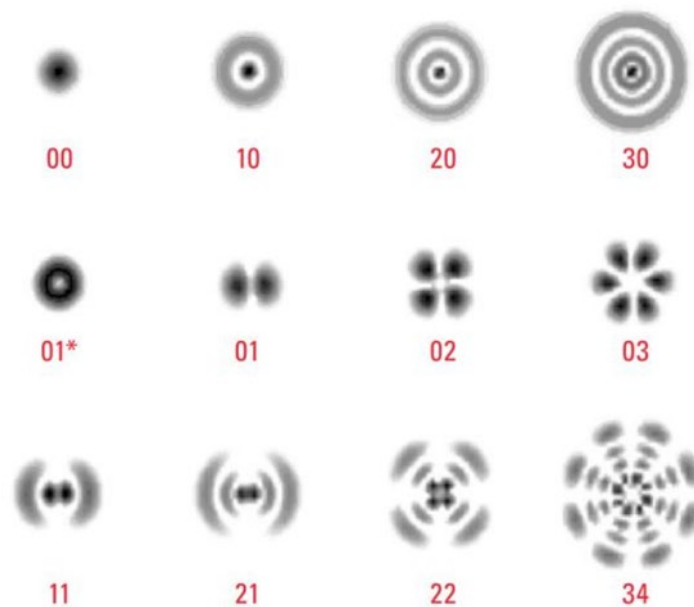
Każdy laser składa się z rezonatora optycznego, zewnętrznego układu pompującego oraz wzbudzonego ośrodka czynnego i działa dzięki zjawisku emisji wymuszonej. Ośrodek aktywny to materia, taka jak np. zbiór jonów, molekuł czy atomów, która wykazuje zdolności do wzmacniania fali elektromagnetycznej. Taki ośrodek może wytworzyć materiał półprzewodnikowy. Z kolei działanie układu pompującego wzbudza ośrodek aktywny do wyższych stanów energetycznych. Poziomy energetyczne określa się za pomocą rozkładu Boltzmanna (przy założeniu że ośrodek aktywny jest w stanie równowagi termodynamicznej) [7]. Rezonator optyczny jest układem pełniącym funkcję zawężenia spektrum widmowego promieniowania i ujednoliceniu go, ukierunkowania promieniowania i zapewnienia niewielkiej rozbieżności kątowej wiązki, zapewnienia dodatniego sprzężenia zwrotnego względem układu pompującego, co pozwala na generowanie promieniowania. Układ chłodzący zapewnia odprowadzenie nadmiaru ciepła, które wydziela się podczas pracy lasera z ośrodka czynnego.

Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest instalowanie wymienników ciepła dookoła rezonatora lub stały przepływ gazu laserowego [8].

Stosowanie obróbki laserowej w przemyśle pozwoliło na dokonanie podziału laserów ze względu na ich różne parametry[9]:

- ze względu na charakter pracy
 - ciągły
 - impulsowy
 - udarowy
- ze względu na moc
 - lasery o dużej mocy
 - lasery o średniej mocy
 - lasery o małej mocy
- ze względu na ośrodek czynny
 - gazowe
 - na ciele stałym
 - półprzewodnikowe
- ze względu na widmo promieniowania
 - pracujące w podczerwieni
 - pracujące w zakresie widzialnym
 - pracujące w nadfiolecie

Poza wspomnianymi własnościami laserów istotny wpływ na obróbkę powierzchniową ma kształt wiązki padającej na obrabiany materiał. Rodzaje modów optycznych przedstawia rysunek nr 2.



Rys. 2. Rodzaje modów optycznych możliwych do wygenerowania przez laser [10]

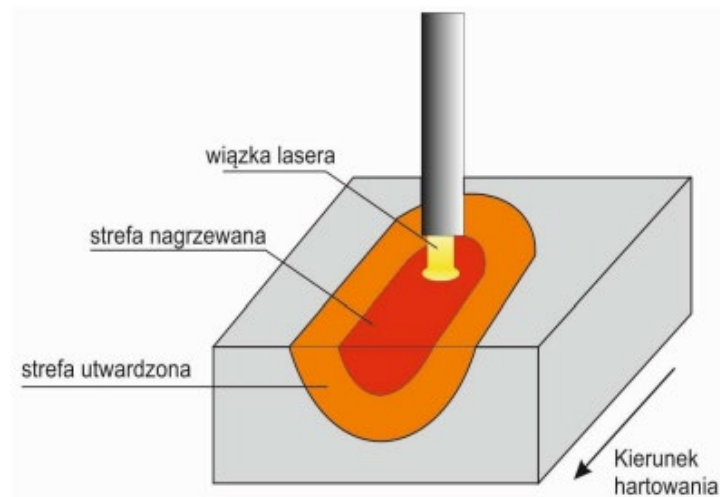
Fig. 2. Types of optical modes that can be generated by a laser [10]

3. Zastosowanie lasera w przemyśle

Na przestrzeni ostatnich lat znacznie wzrosło zainteresowanie technologiami wykorzystującymi lasery do przeprowadzania procesów materiałowych takich jak: przetapianie, stopowanie, obróbka cieplna, napawanie czy technologie przyrostowe. Ze względu na duży potencjał i atrakcyjność stosowania technologii laserowych w przemyśle ich rozwój przebiega dynamicznie, a ulepszenia sprawiają, że procesy te są coraz bardziej wydajne [11]. Przy powierzchniowej obróbce laserowej, na przykład podczas stopowania czy hartowania z przetapianiem, ważnym aspektem jest zadbanie o zachowanie geometrii powierzchni wyrobu oraz odpowiedniej chropowatości. Kolejnym parametrem wymagającym uwagi są powstające w strefie oddziaływania lasera naprężenia mogące prowadzić do uszkodzeń w materiale. Aby zniwelować wpływ wysokiej temperatury, stosowana jest obróbka mechaniczna warstwy wierzchniej, najczęściej przez szlifowanie. Niestety to rozwiązanie sprawia, że uzyskana dzięki wpływowi lasera warstwa może zmienić swoje właściwości mechaniczne oraz przybiera ona nierówną grubość [12].

Procesy przemysłowe wykorzystujące laser to [13]:

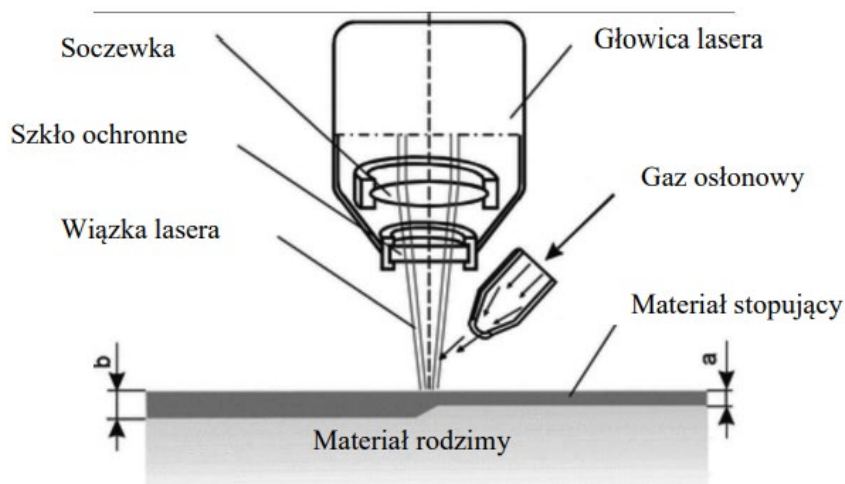
- Laserowa obróbka cieplna – stosowanie wysokiej temperatury nagrzewania i szybkości chłodzenia większej od krytycznej umożliwia polepszenie właściwości mechanicznych przez uzyskiwanie roztworów stałych silnie przesyconych, o drobnoziarnistej strukturze.



Rys. 3. Schemat hartowania laserowego [14]

Fig. 3. Scheme of laser hardening [14]

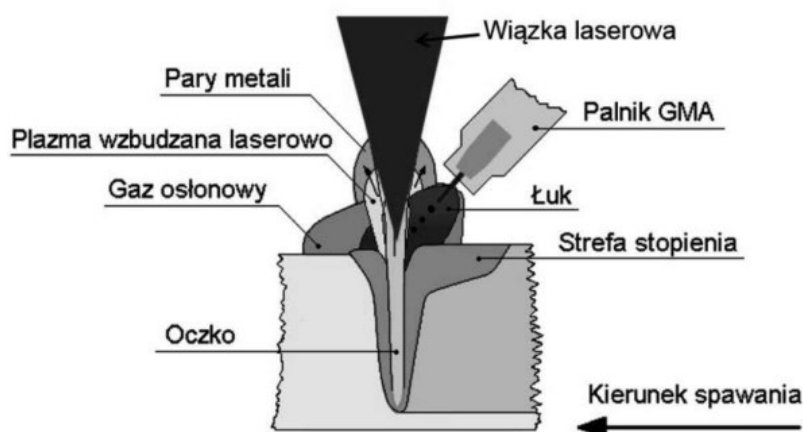
- Laserowe stopowanie – wzbogacanie warstwy wierzchniej w pierwiastki chemiczne, które dostarczane są w formie sproszkowanej. Uzyskuje się w ten sposób warstwę wierzchnią o odmiennym składzie chemicznym i właściwościach w stosunku do materiału rodzimego. Wygenerowane zmiany prowadzą do polepszenia właściwości antykorozyjnych, mechanicznych i trybologicznych.



Rys. 4. Schemat stopowania laserowego [15]

Fig. 4. Scheme of laser alloying [15]

- Laserowe natapianie – określane również jako platerowanie lub napawanie, stosowane powszechnie w celu regeneracji urządzeń i maszyn, a także poprawienia dokładności wymiarowo-kształtowej konkretnych elementów. Polega na stopieniu masywnej części materiału wierzchniego i cienkiej warstwy podłoża.

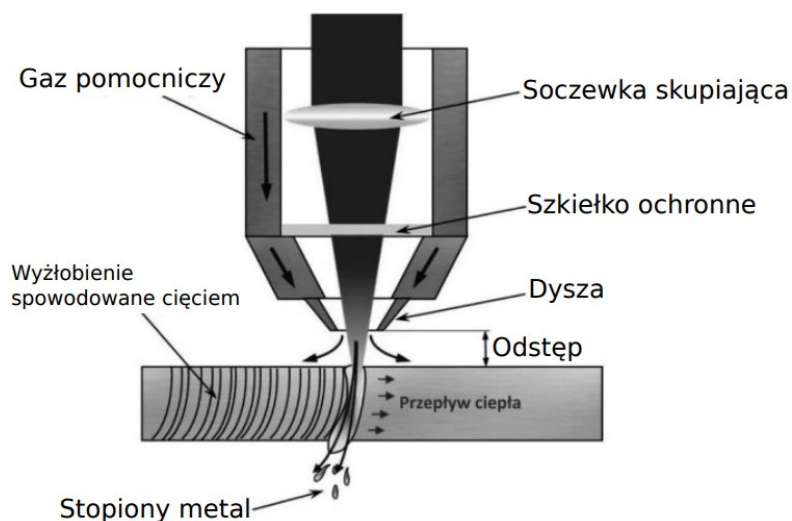


Rys. 5. Schemat napawania laserowego [15]

Fig. 5. Scheme of laser surfacing [15]

- Laserowe wtapianie – w toku procesu dochodzi do stopienia osnowy materiału wskutek wysokoenergetycznego oddziaływania lasera. Ma to na celu dostarczenie do struktury cząstek twardych faz.
- Laserowe przetapianie powierzchni – krótki czas procesu sprawia, że niewielka część energii przenika w głąb materiału, powodując powstanie znacznego gradientu temperaturowego między warstwami. Sprzyja to szybkiemu krzepnięciu i umożliwia uzyskanie struktury drobnoziarnistej warstwy wierzchniej, co bezpośrednio przyczynia się do poprawy odporności na ścieranie.

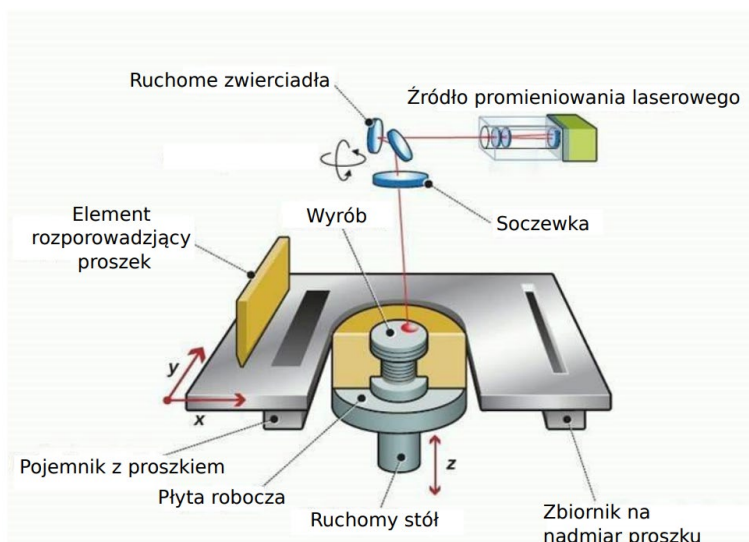
- Laserowe cięcie – zastosowanie lasera o odpowiednio dużej mocy pozwala nagrzać materiał aż do jego stopienia lub całkowitego odparowania. Właściwy proces cięcia rozpoczyna się, kiedy wiązka laserowa całkowicie wniknie w materiał w jednym punkcie.



Rys. 6. Schemat cięcia laserowego [15]

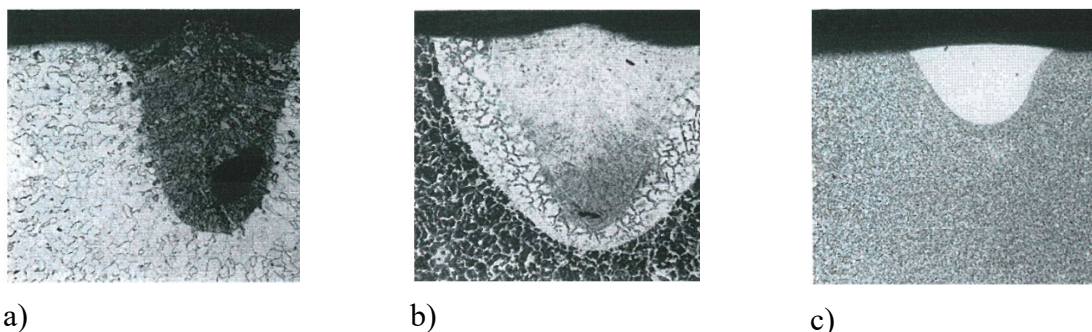
Fig. 6. Scheme of laser cutting [15]

W czasie laserowego przetapiania warstwy zewnętrznej materiału dochodzi do powstawania plazmy, która pomaga w ograniczeniu strefy wpływu wysokiej temperatury na materiał oraz aktywnie działa na przetopioną powierzchnię. Plazma odgrywa ważną rolę podczas procesów laserowego przetapiania, ponieważ podnosi ciśnienie oraz miesza materiał w jeziorunku ciekłym. Po procesie przetapiania na powierzchni materiału powstaje krzywizna, podczas gdy lejkowate zagłębienie wywołane wiązką lasera pod wpływem działających sił hydrostatycznych cieczy zostaje zaburzone, co doprowadza do powstania wypłytki znajdującej się na brzegu przetopienia [11]. Technologie przyrostowe z użyciem lasera najczęściej stosowane są do spiekania oraz topienia proszków metali. Najczęściej spotykanymi laserowymi technologiami przyrostowymi są SLS oraz SLM. Zasadnicza różnica pomiędzy tymi metodami wynika z własności uzyskanych wyrobów ponieważ porowatość detali wytworzonych w technologii SLM jest znikoma, a ich gęstość może dochodzić nawet do 100%, natomiast wyroby wytworzone metodą SLS cechują się znacznie wyższą porowatością oraz zauważalnie niższymi własnościami wytrzymałościowymi. Przyrostowe wytwarzanie z użyciem lasera polega na wprowadzeniu na stół cienkiej warstwy sproszkowanego metalu oraz jej spiekaniu lub topieniu. Zabieg ten powtarzany jest wielokrotnie, dzięki czemu warstwa po warstwie wytwarzany jest detal. Dobierając odpowiedni proszek, metodę oraz zastosowane parametry, możemy uzyskać pożądaną strukturę oraz własności wytwarzanego detalu [16]. Przykładowy schemat urządzenia służącej do laserowego wytwarzania przyrostowego pokazuje rysunek 7.



Rys. 7. Schemat urządzenia do wytwarzania technologii przyrostowego spiekania proszków [17]
 Fig. 7. Scheme of the device for the production of powder incremental sintering technology [17]

Laserowa obróbka powierzchni jest stosowana w celu zmiany, poprawy własności warstwy wierzchniej obrabianego materiału. Dokonuje się tego przez przetopienie, nadtopienie lub zahartowanie obrabianej powierzchni. Ze względu na skoncentrowany charakter wiązki laserowej konieczne jest wielokrotne przejście wiązki aby uzyskać pożądane własności na całej powierzchni [7]. Przykładowe zmiany w strukturze przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Struktura warstwy wierzchniej po obróbce laserowej stali: a) E04J, b) 45, c) N8E [18]
 Fig. 8. Structure of the surface layer after laser treatment of steel: a) E04J, b) 45, c) N8E [18]

Pierwotnie laser skonstruowany był na wzór ówczesnie znanych masywnych urządzeń do obróbki mechanicznej. W miarę rozwoju przemysłowego jego gabaryty znacznie pomniejszono i zoptymalizowano. Stale rosnące wymagania odnośnie do dokładności wymiarowo-kształtowej detali, które mogą mieć skomplikowane powierzchnie, wymusiły opracowanie technologii o zwiększonej dokładności, szczególnie procesy teksturowania i piaskowania powierzchni, które będą pełniły odpowiedzialne funkcje, np. w procesach przetwórstwa tworzyw sztucznych jako matryce. Dzięki możliwości sterowania samą wiązką, a nie obrabianym przedmiotem, technologia laserowa zaczęła pozwalać na obróbkę dużo większych przedmiotów oraz w trudno dostępnych miejscach. Obecnie odnotowuje się stale rosnący wzrost automatyzacji linii produkcyjnych [1]. Osiągnięcia współczesnego przemysłu

umożliwiły skonstruowanie kompleksowych i rozbudowanych stanowisk produkcyjnych, gdzie roboty są w stanie pracować zarówno autonomicznie, jak i synchronicznie. Roboty wykorzystujące proces laserowej obróbki powierzchni zapewniają wysoką powtarzalność, łatwość manipulacji w czasie produkcji oraz pozwalają na wyeliminowanie błędów spowodowanych długotrwałą pracą operatora. Branża motoryzacyjna szczególnie czerpie z osiągnięć automatyzacji obróbki laserowej. To sztandarowy przykład produkcji seryjnej, od której wymaga się wysokiej powtarzalności i porównywalnej jakości produkowanych elementów. Zautomatyzowany laser jest w stanie ukształtować skomplikowane i rozwinięte powierzchnie z bardzo dużą dokładnością. Mimo oczywistych superlatyw nawet najbardziej zaawansowanym na chwilę obecną robotom brakuje elastyczności i swego rodzaju inteligencji w działaniu. Powoduje to, że nie są w stanie sprostać elementom, od których oczekuje się najwyższej jakości wykonania. Kompromisem w tych przypadkach są lasery półautomatyczne, które podlegają w pewnym stopniu kontroli operatora, łącząc precyzję z decyzywnością [4].

4. Podsumowanie

Laserowa obróbka materiałów odgrywa ważną rolę we współczesnym przemyśle wytwórczym i gospodarce. Podczas gdy procesy cięcia laserowego, spawania, znakowania i wiercenia osiągnęły szczyt możliwości i zyskały szeroką akceptację w przemyśle, nowe osiągnięcia w ostatnich latach w produkcji przyrostowej i mikro-/nanoprodukcji dały nowe możliwości, które lasery mogą wnieść do przemysłu wytwórczego. Wraz z dostępnością laserów o dużej mocy, takich jak lasery światłowodowe i dyskowe, a także ultraszybkich laserów, takich jak lasery femto- i pikosekundowe, pojawiają się nowe zjawiska interakcji wiązka-materiał. Badania nad rozwojem nowych technologii, optymalizacją, modelowaniem/symulacją i zrozumieniem podstaw nauki (interakcje wiązka-materiał, charakterystyka materiału i nowe właściwości materiałów generowanych przez lasery), które są zaangażowane w obróbkę laserową, odgrywają kluczową rolę w rozwoju nauki i technologii obróbki materiałów [20].

Bibliografia

1. Javidi A., Rieger U., Eichlseder W., The effect of machining on the surface integrity and fatigue life, *International Journal of Fatigue* 30(10) (2008) 2050-2055. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.01.005>
2. du Plessis A., Yadroitsava I., Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: A review focusing on X-ray tomography insights, *Materials & Design* 187 (2020) 108385. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108385>

3. Shigang A., Daining F., Rujie H., Yongmao P., Effect of manufacturing defects on mechanical properties and failure features of 3D orthogonal woven C/C composites, *Composites Part B: Engineering* 71 (2015) 113-121.<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.003>
4. Shi Y., Yang X., Yang D., Shi D., Miao G., Wang Z., Evaluation of the influence of surface crack-like defects on fatigue life for a P/M nickel-based superalloy FGH96, *International Journal of Fatigue* 137 (2020) 105639.<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105639>
5. Bonek M., Dobrzański L.A., Hajduczek E., Klimpel A. Structure and properties of laser alloyed surface layers on the hot-work tool steel, *Journal of Materials Processing Technology* 175 (2006).
6. Janiak P., Kierepka J., Kocyan E., Konieczny M., Wójtowicz A., Bonek M., Polishchuk O., Aspekty praktyczne, teoretyczne i prawne procesu technologicznego laserowej obróbki powierzchniowej, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, 28 stycznia 2022.
7. Kujawski A., Szczepański P., *Lasery Podstawy fizyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
8. Czupryński A., Rzeźnikiewicz A., *Specjalne technologie spawalnicze w ćwiczeniach laboratoryjnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2020.
9. Radziejowska J., *Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polska Akademia Nauk, Warszawa 2011.
10. Borlinghaus R.T. Leica Microsystems, 20 7 2011. [Online]. Available: <https://www.leica-microsystems.com/science-lab/lasers-for-confocal/>
11. Dobrzański L.A., Dobrzańska-Danikiewicz A.D., *Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich*, Open Access Library, Volume 5, 2011.
12. Radziejowska J., *Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polska Akademia Nauk, Warszawa 2011.
13. Kusiński J., *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2000.
14. Busz P., Podolska A., Bonek M., *Przegląd aplikacji lasera w inżynierii materiałowej*, PSKN, zeszyt nr 31/2014, Gliwice 2014.
15. Bodnar A., Gajczowska D., Głowinkowski T., Jerominek P., Jędrzejczyk K., Świerczek P., Bonek M., Polishchuk O., *Obróbka laserowa jako nowoczesna technologia w inżynierii powierzchni*, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Faculty of Mechanical Engineering, Silesian University of Technology 27th January 2023.
16. Stwora A., Skrabalak G., *Wpływ parametrów technologicznych procesu selektywnego topienia laserowego na wybrane właściwości elementów wykonanych z proszków stopu AlSi10Mg*. *Mechanik*, 89 (3), 2016, 206-208.

17. Berkowski L. Wpływ stanu strukturalnego na skutki obróbki laserowej stali o różnym składzie chemicznym. Część I: Stale węglowe, *Obróbka Plastyczna Metali*, vol. XXIX, nr 2 (2018), s. 127-138.
18. Ciecńska B., Kluz R. Obróbka laserowa powierzchni z wykorzystaniem robota przemysłowego, *Technologia i Automatykacja Montażu*, 3, 2014, 205-208.
19. Barczyk J., Kłosowiak M. Robotyzacja cięcia laserowego, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 6, 2005.
20. Li L. *The Challenges Ahead for Laser Macro, Micro and Nano Manufacturing, Advances in Laser Materials Processing (Second Edition)*, 2018.

INNOWACYJNE APLIKACJE LASEROWEJ OBRÓBK POWIERZCHNIOWEJ

Streszczenie

Artykuł zawiera opis procesów obróbki laserowej stosowanych w inżynierii powierzchni. W pracy przedstawiono najczęściej stosowane metody laserowej obróbki powierzchni oraz zaprezentowano sposób ich zastosowania w przemyśle. Ze względu na wysoką wydajność i zmniejszenie kosztów produkcji przemysł coraz częściej postanawia wdrożyć automatyzację oraz robotyzację stanowisk roboczych.

Słowa kluczowe: inżynieria powierzchni, laser, przemysł

INNOVATIVE LASER SURFACE TREATMENT APPLICATIONS

Abstract

This work contains a description of laser processing processes used in surface engineering. The paper presents the most commonly used methods of laser surface treatment and the way of their application in industry. Due to the high efficiency and reduction of production costs, the industry more and more often decides to implement automation and robotization of workstations.

Keywords: surface engineering, laser, industry

Krzysztof FOIT¹, Marek WITAŃSKI²

ROZSZERZENIE TYPOWEGO CHWYTAKA PRZEMYSŁOWEGO O FUNKCJE ZWIĄZANE Z PERCEPCJĄ OTOCZENIA

1. Wprowadzenie

Intensywny rozwój przemysłu w zakresie nowych technologii i metod wytwarzania związany jest głównie z postępującą cyfryzacją i informatyzacją każdego z etapów procesu produkcyjnego. W szczególności filozofia Industry 4.0 i 5.0 kładzie duży nacisk na wdrażanie inteligentnych systemów zarządzania i organizacji produkcji. Odchodząc od dotychczasowych rozwiązań, dąży się do uzyskania systemów zdecentralizowanych pod względem sterowania, autonomicznych jednostek zdolnych do samoorganizacji w klastry umożliwiające realizację zadanego procesu w ramach konkretnego parku maszynowego i posiadanych środków transportu wewnętrznego. Industry 5.0 zmienia podejście do pracownika, wprowadzając w szerszym aspekcie interakcję pomiędzy człowiekiem a maszyną, kładąc jednocześnie nacisk na powszechniejsze zastosowanie Internetu Rzeczy (IoT) w takich systemach [1]. Bezpośrednia współpraca człowieka z maszyną jest realizowana między innymi przez wprowadzanie do procesów produkcji tzw. kobotów, czyli lekkiej odmiany robotów, wyposażonych w zaawansowane systemy bezpieczeństwa, mające na celu zminimalizowanie szansy oraz skutków ewentualnej kolizji manipulatora z operatorem znajdującym się w przestrzeni roboczej koboty. Koncepcja Industry 5.0 rozszerza ochronę pracownika współpracującego z maszyną przez wprowadzenie różnego rodzaju czujników, mających pełnić funkcję podobną do zmysłów człowieka, oraz przez sprzęgnięcie ich z systemem sztucznej inteligencji w celu przewidywania sytuacji niebezpiecznych i zapobiegania im [2]. W przypadku kobotów i robotów ważnym elementem są również chwytaki, wyposażone w sensory, które z jednej strony poszerzają możliwość percepcji otoczenia przez system sterowania robota, z drugiej zaś przyczyniają się do zwiększenia bezpieczeństwa współpracy z człowiekiem.

Świadomość zmian zachodzących w nowoczesnym przemyśle powoduje również konieczność dostosowania metod kształcenia przyszłych inżynierów, spośród których będą

¹ krzysztof.foit@polsl.pl, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska.

² marewit556@student.polsl.pl, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska.

w przyszłości rekrutować się pracownicy przemysłu. Nie każdy etap nauki wymaga jednak stosowania zaawansowanych maszyn i oprzyrządowania, stąd warto zachęcać studentów do eksperymentowania w zakresie budowy i eksploatacji systemów, wykorzystując do tego celu popularne i niedrogie rozwiązania, oparte na mikrokontrolerach. W niniejszym artykule przedstawiono prototyp prostego rozszerzenia typowego chwytaka przemysłowego, umożliwiającego realizację wybranych funkcji, poszerzających percepcję otoczenia przez robota przemysłowego. W kolejnych rozdziałach zaprezentowano krótkie podsumowanie obecnego stanu wiedzy związanego z inteligentnymi chwytakami oraz przedstawiono założenia i projekt rozszerzenia chwytaka wraz z układem sterowania. W kolejności opisano zasadę działania wykonanego rozszerzenia oraz przedstawiono wyniki testów chwytaka, zamontowanego na kiści robota.

2. Obecny stan wiedzy

Współcześnie chwytaki wyposażone w różne rodzaje sensorów używane są w robotyce w dwóch oddzielnych segmentach: jako chwytaki kolaboracyjne, przeznaczone do zastosowania w połączeniu z manipulatorami kobotów, oraz jako chwytaki „inteligentne”, do zastosowania w połączeniu z manipulatorami typowych robotów przemysłowych. W pierwszym przypadku duży nacisk kładzie się na bezpieczeństwo – w szczególności uwzględnia się możliwość kolizji lub kontaktu z ciałem pracownika. Chwytaki „inteligentne” znajdują zastosowanie w aplikacjach, w których konieczne jest dostosowanie rodzaju i siły uchwytu do konkretnego rodzaju przedmiotu, co często poprzedzone jest jego identyfikacją za pomocą systemu wizyjnego lub etykiet elektronicznych (np. znaczniki RFID).

Chwytaki kolaboracyjne budowane są na podstawie wytycznych pochodzących z norm i standardów. Wśród ważnych dokumentów odnoszących się do problemu zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa podczas pracy z robotem lub kobotem należy wymienić ISO/TS 15066 oraz ISO/TR 20218-1 [3, 4]. W przypadku ISO/TS 15066 wytyczne odnoszą się ogólnie do kolizji lub kontaktu elementów maszyny z ciałem pracownika, podczas gdy w przypadku ISO/TR 20218-1 następuje odniesienie bezpośrednio do robotyki i efektora zamontowanego na kiści robota. Jeśli chodzi o chwytak kolaboracyjny, mogą być stosowane zarówno pasywne środki bezpieczeństwa, takie jak:

- brak ostrych krawędzi,
 - zredukowana masa,
 - zwiększone pole powierzchni poszczególnych elementów,
 - zastosowanie odpowiednich tworzyw i materiałów,
- jak i aktywne, np.:
- pomiar siły podczas kontaktu,

- wykrywanie obecności obiektów w pobliżu chwytaka,
- sterowanie siłą uchwycenia przedmiotu.

Mariscal i in. [5] zwracają jednak uwagę, że przypadki wymienione w normach i standardach często odnoszą się do sytuacji idealnych i wskazują przykładowo na kwestie związane z limitem siły nacisku podczas kontaktu ciała operatora z przedmiotem manipulowanym, gdy to właśnie obiekt może mieć ostre krawędzie. Podobną uwagę czynią Rosenstrauch i Krüger [6]. Z tego względu autorzy [5] zauważają, że nie w każdej sytuacji zabezpieczenia wynikające z zastosowania norm są wystarczające i zalecają dodatkowo stosowanie odpowiednich środków ochrony osobistej.

Do dokumentu ISO/TS 15066 odnoszą się również Weitschat i in. [7]. Autorzy skupiają się jednak nie na samym efektorze, ale na sposobie zabezpieczenia standardowego narzędzia przed kontaktem z ciałem operatora podczas wykonywania ruchu w przestrzeni, w której może nastąpić potencjalna kolizja. Proponowanym rozwiązaniem jest pompowana osłona, tworząca rodzaj poduszki powietrznej, okalającej narzędzie wraz z przedmiotem manipulowanym.

Kaiser i in. [8], odnosząc się do bezpiecznej eksploatacji chwytaków, wypowiadają się w podobnym tonie jak Mariscal i in. [5], wskazując m.in. na konieczność stosowania kształtowego uchwycenia przedmiotu w celu zminimalizowania prawdopodobieństwa upuszczenia podczas zaniku zasilania, stosowania czujników siły w celu zapobiegania uszkodzeniom ciała w trakcie przypadkowego zamknięcia końcówek chwytanych oraz rekomendują stosowanie chwytaków z elastycznymi końcówkami chwytanymi, jako rozwiązania bezpiecznego podczas ewentualnego kontaktu z ciałem operatora.

W odniesieniu do konstrukcji chwytaków „inteligentnych”, przeznaczonych do stosowania z typowymi manipulatorami przemysłowymi, najczęściej używa się pomiaru siły nacisku końcówek chwytanych na przedmiot w celu właściwego uchwycenia i zapobiegania poślizgowi [9-13], często w połączeniu z zaawansowanymi algorytmami sterującymi, w tym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. Bardziej zaawansowane konstrukcje wyposażano w dodatkowe czujniki. W pracach [11] i [12] przedstawiono zaawansowany chwytak do podłączania miniaturowych wtyczek do gniazd na płytach PCB. Oprócz detekcji siły uchwycenia przedmiotu i siły nacisku podczas wkładania wtyczki do gniazda chwytak wyposażono w laserowy czujnik odległości, mierzący dystans do płyty PCB, czujnik podczerwieni, wykrywający przeszkody, oraz minikamerę służącą do detekcji położenia gniazda w celu odpowiedniego obrócenia chwytaka trzymającego wtyczkę. W pracy [13] przedstawiono eksperymentalną konstrukcję chwytaka służącego do przenoszenia różnego rodzaju przedmiotów manipulowanych. Oprócz doboru odpowiedniej siły uchwycenia przedmiotu sterowano również sposobem uchwycenia, w zależności od szerokości lub średnicy przedmiotu. W celu prawidłowej realizacji zadania chwytak wyposażono w czujniki siły chwytu, czujniki dotykowe, optyczny czujnik odległości oraz optyczny czujnik ruchu do detekcji poślizgu przedmiotu w trakcie manipulacji.

Omówione przykłady stanowią jedynie niewielki, lecz reprezentatywny wycinek szerokiego pola badań nad „inteligentnymi” chwytakami. Mimo że większość rozwiązań jest konstrukcyjnie podobna do siebie, jednak zauważalne są różnice w doborze algorytmów pomiarowych i sterujących, których celem jest zapewnienie niezawodnej i bezpiecznej pracy narzędzi.

3. Założenia konstrukcyjne

Konstrukcja przedstawiona w niniejszym artykule ma charakter prototypowy. W ramach realizacji zadania zaprojektowano i wykonano końcówki chwytne do typowego chwytaka przemysłowego – w tym przypadku był to pneumatyczny chwytak FESTO DHPS 16-A-NC (rys. 1). Założono, że chwytak będzie współpracował z robotem, realizując podstawową komunikację przez standardowy system wejść i wyjść kontrolera robota. Zdecydowano, że sensory zostaną umieszczone w końcówkach chwytanych, natomiast za komunikację będzie odpowiedzialny mikrokontroler Arduino MKR 1010, współpracujący z wyświetlaczem. Zestaw sensorów składa się z:

- ultradźwiękowego czujnika odległości,
- czytnika znaczników RFID,
- naciskowych czujników siły,
- czujnika orientacji przestrzennej.



Rys. 1. Chwytak FESTO serii DHPS [14]

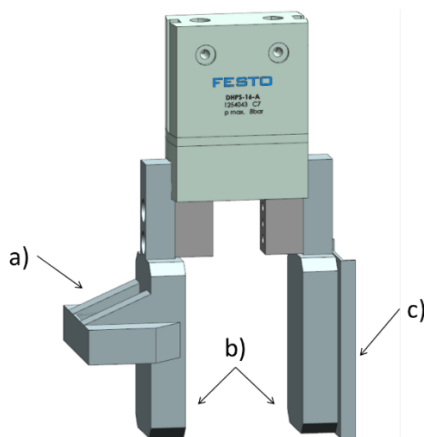
Fig. 1. The DHPS series FESTO gripper [14]

Założono również, że końcówki chwytne wraz z elementami konstrukcyjnymi, podtrzymującymi sensory, będą wytworzone metodą druku 3D. Wyświetlacz i czujnik orientacji przestrzennej będą zamocowane na płaskiej powierzchni obudowy chwytaka.

4. Konstrukcja rozszerzenia chwytaka

Projekt końcówek chwytanych utworzono w programie klasy CAD. Na rys. 2 przedstawiono model chwytaka z zamontowanymi końcówkami chwytanymi i opisem rozmieszczenia poszczególnych sensorów. W opisie nie ujęto wyświetlacza i czujnika orientacji przestrzennej, które zamocowano bezpośrednio na obudowie chwytaka. W końcówkach chwytanych przewidziano również otwory służące do przewleczenia przewodów sygnałowych i zasilających odpowiednie czujniki. Chwytnak z oprzyrządowaniem i zamontowanymi końcówkami chwytanymi i przedstawiono na rys. 3.

Ultradźwiękowy czujnik odległości ma za zadanie czuwać nad prawidłowością przebiegu procesu uchwycenia przedmiotu. Założono, że podejście i uchwycenie przedmiotu będą realizowane od góry (przedmioty o kształcie prostopadłościennym). Istotne jest zatem wyznaczenie położenia punktu TCP narzędzia względem górnej powierzchni przedmiotu manipulowanego, co ma bezpośrednie przełożenie na usytuowanie sensora.



Rys. 2. Rozmieszczenie sensorów na końcówkach chwytanych: a) ultradźwiękowy czujnik odległości, b) czujniki nacisku, c) czytnik znaczników RFID (opracowanie własne)

Fig. 2. Placement of sensors on the gripper fingers: a) ultrasonic proximity sensor, b) pressure sensors, c) RFID tag reader (own work)



Rys. 3. Prototypowa wersja końcówek chwytanych wraz z czujnikami, zamontowana na chwytaku (opracowanie własne)

Fig. 3. A prototype version of gripper fingers equipped with sensors, mounted on the gripper (own work)

Czujniki nacisku nie mają wstępnej kalibracji, dlatego nie podają wartości w jednostkach siły, a jedynie jako wielkości bezwymiarowe, wyrażone za pomocą liczb rzeczywistych. Wartości siły uchwycenia, zapewniającej właściwe trzymanie przedmiotu manipulowanego, bez ryzyka jego zniekształcenia lub upuszczenia, wyznaczono na drodze eksperymentów.

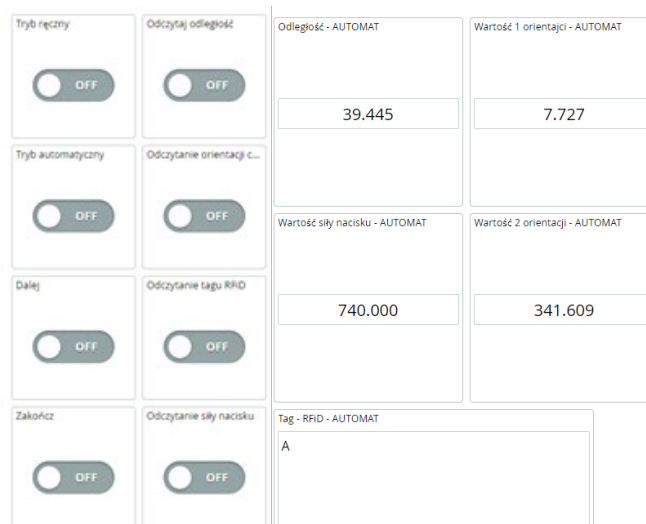
Zadaniem czytnika znaczników RFID jest rozpoznanie przedmiotu, co umożliwia podjęcie odpowiednich akcji przez system sterowania manipulatora robota, np. odłożenie przedmiotu manipulowanego w miejsce przeznaczone dla danego typu obiektów.

Sygnały z czujników integruje i przetwarza mikrokontroler Arduino, który odpowiada również za komunikację z użytkownikiem za pomocą wyświetlacza i interfejsu typu web, przez chmurę IoT oraz za komunikację z układem sterowania robota, z użyciem systemu wejść/wyjść.

5. Zasada działania

Komunikacja z mikrokontrolerem Arduino, sterującym pracą chwytaka, może odbywać się w jednym spośród trzech trybów:

- przez monitor portu szeregowego w środowisku programowania Arduino,
- przez monitor portu szeregowego w przeglądarkowej wersji środowiska Arduino,
- przez utworzony interfejs web, działający w przeglądarce, w chmurze IoT (rys. 4),



Rys. 4. Interfejs sterowania utworzony w chmurze IoT (opracowanie własne)
Fig. 4. The control interface built in the IoT cloud (own work)

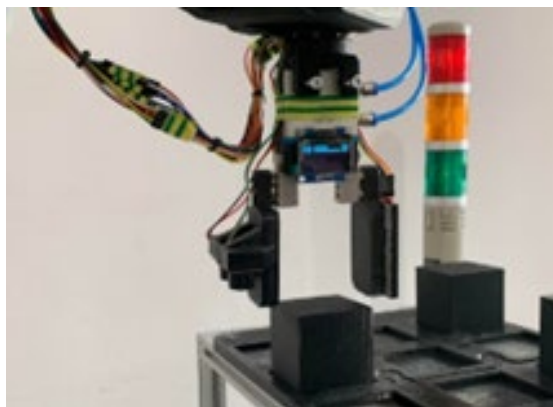
Tryb portu szeregowego jest emulowany programowo. Wymagane jest połączenie mikrokontrolera z komputerem za pomocą przewodu USB. Tryb chmury IoT wymaga z kolei połączenia mikrokontrolera z siecią bezprzewodową.

Program mikrokontrolera utworzono w dedykowanym oprogramowaniu Arduino IDE, używając bibliotek do obsługi sensorów oraz wyświetlacza. W przypadku komunikacji poprzez monitor portu szeregowego, użytkownik wywołuje odpowiednie komendy poprzez wpisanie z klawiatury komputera znaku wyświetlanego obok odpowiedniej opcji na wyświetlaczu. Komunikacja za pomocą chmury IoT odbywa się z poziomu komputera lub urządzenia przenośnego (smartfon, tablet) przy użyciu standardowego interfejsu graficznego.

Praca chwytaka może odbywać się w dwóch trybach: ręcznym oraz automatycznym. Tryb ręczny umożliwia przeprowadzenie testów poprawności działania sensorów, natomiast automatyczny wspiera układ sterowania robota podczas przeprowadzania operacji pick-and-place, umożliwiając poszerzoną percepcję otoczenia za pomocą pomiaru odległości od przedmiotu oraz pomiaru siły wywieranej przez końcówki chwytne na przedmiot.

6. Testy utworzonego prototypu

Testy chwytaka wraz z oprzyrządowaniem przeprowadzono z użyciem robota (rys. 5). Robot był umieszczony na stanowisku wyposażonym w magazyny przedmiotów (wejściowy oraz wyjściowy). Przedmioty manipulowane miały kształt prostopadłościenny. W kolejności zadano punkty trajektorii i napisano program sterujący robotem. Zadanie polegało na przemieszczeniu manipulatora do miejsca, z którego miał być pobrany przedmiot, odpowiednim ustawieniu chwytaka, którego prawidłowość potwierdzana była przez mikrokontroler sygnałem zezwolenia na zamknięcie chwytaka. W kolejności następowało sprawdzenie przez mikrokontroler siły nacisku i odczyt znacznika RFID. W dalszym ciągu manipulator przemieszczał się nad magazyn wyjściowy i następowało odłożenie przedmiotu manipulowanego we właściwe miejsce.



Rys. 5. Chwytnik wraz z oprzyrządowaniem, zamontowany na kiści robota (opracowanie własne)
Fig. 5. The gripper with an equipment, mounted on the robot wrist (own work)

Przeprowadzone testy potwierdziły oczekiwaną funkcjonalność chwytaka wyposażonego w specjalne końcówki chwytne i zestaw sensorów. Dokładności pomiarów mieściły się w granicach spodziewanych w odniesieniu do niskiej klasy czujników, przeznaczonych do zastosowań amatorskich i półprofesjonalnych.

7. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano prototypową konstrukcję chwytaka wyposażonego w specjalnie zaprojektowane końcówki chwytne, umożliwiające montaż sensorów poszerzających możliwości percepcji otoczenia przez robota. Pod względem funkcjonalności, rozwiązanie to nie ustępuje podobnym, prezentowanym w literaturze naukowej, jednocześnie – pod względem kosztów i nakładu pracy – pozostając w zasięgu możliwości kół naukowych czy osób piszących prace dyplomowe. Jednocześnie jest to forma uniwersalna, która może być eksploatowana z dowolnym rodzajem robota przemysłowego, przez co przedstawione rozwiązanie może posłużyć zarówno do prowadzenia badań naukowych, jak i jako pomoc dydaktyczna podczas zajęć laboratoryjnych.

Dalsze badania będą miały na celu przede wszystkim optymalizację konstrukcji końcówek chwytnych i zastosowanie dokładniejszych sensorów o mniejszych rozmiarach. Rozważa się również zastosowanie mikrokontrolera o większym rozmiarze pamięci i większych możliwościach obliczeniowych, co pozwoli na uruchamianie bardziej zaawansowanych programów.

Bibliografia

1. Duggal A.S., Malik P.K., Gehlot A., Singh R., Gaba G.S., Masud M., Al-Amri J.F.: A sequential roadmap to Industry 6.0: Exploring future manufacturing trends. *IET Communications*. 16, 521–531 (2022). <https://doi.org/10.1049/cmu2.12284>.
2. Nahavandi S.: Industry 5.0–A Human-Centric Solution. *Sustainability*. 11, 4371 (2019). <https://doi.org/10.3390/su11164371>.
3. ISO/TS 15066:2016, <https://www.iso.org/standard/62996.html>, [dostęp: 2023.04.07].
4. ISO/TR 20218-1:2018, <https://www.iso.org/standard/69488.html>, [dostęp: 2023.04.07].
5. Mariscal Saldaña M.Á., González Pérez J., Khalid A., Gutiérrez Llorente J.M., García Herrero S.: Risks management and cobots. Identifying critical variables (2019). <https://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-3>.
6. Rosenstrauch M.J., Krüger J.: Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using ISO/TS 15066. In: 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). pp. 740–744 (2017). <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2017.7942795>.

7. Weitschat R., Vogel J., Lantermann S., Höppner H.: End-effector airbags to accelerate human-robot collaboration. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 2279–2284 (2017). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989262>.
8. Kaiser L., Schlotzhauer A., Brandstötter M.: Safety-Related Risks and Opportunities of Key Design-Aspects for Industrial Human-Robot Collaboration. [In:] Ronzhin A., Rigoll, G., Meshcheryakov R. (eds.): Interactive Collaborative Robotics, pp. 95–104. Springer International Publishing, Cham (2018). https://doi.org/10.1007/978-3-319-99582-3_11.
9. Zaki A.M., Soliman A.M., Mahgoub O.A., El-Shafei A.M.: Design and implementation of efficient intelligent robotic gripper. [In:] Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control, pp. 710–716 (2010).
10. Huang S.-J., Chang W.-H., Su J.-Y.: Intelligent robotic gripper with adaptive grasping force. *Int. J. Control Autom. Syst.* 15, 2272–2282 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12555-016-0249-6>.
11. Chen F.: Design and Application of an Intelligent Robotic Gripper for Accurate and Tolerant Electronic Connector Mating. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 25 (2013).
12. Chen F., Sekiyama K., Di P., Huang J., Fukuda T.: i-Hand: An intelligent robotic hand for fast and accurate assembly in electronic manufacturing. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 1976–1981 (2012). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225240>.
13. Pettersson-Gull P., Johansson J.: Intelligent Robotic Gripper With an Adaptive Grasp Technique, Master Thesis (2018).
14. Festo: Chwytek Równoległy DHPS, https://www.festo.com/pl/pl/p/chwytek-rownolegly-id_DHPS/, [dostęp: 2023.04.07].

ROZSZERZENIE TYPOWEGO CHWYTAKA PRZEMYSŁOWEGO O FUNKCJE ZWIĄZANE Z PERCEPCJĄ OTOCZENIA

Streszczenie

Rozwój współczesnego przemysłu jest w dużej mierze związany z wdrażaniem nowych technologii i metod wytwarzania opartych na rozwiązaniach z dziedziny informatyki. Filozofia Industry 4.0 i 5.0 kładzie duży nacisk na wdrażanie inteligentnych rozwiązań, dążąc do uzyskania systemów zdecentralizowanych i zdolnych do samoorganizacji. Również w szerszym aspekcie rozważane są tematy współpracy człowieka z maszyną, w tym z robotami. Koncepcja Industry 5.0 wprowadza zaawansowane systemy bezpieczeństwa, które korzystają z czujników w sposób podobny do zmysłów człowieka i są zdolne do przewidywania sytuacji niebezpiecznych i zapobiegania im. Nowoczesne chwytaki, będąc ważnym elementem

wyposażenia robota, coraz częściej są wyposażane w sensory, które nie tylko poszerzają możliwość percepcji otoczenia przez robota, lecz także zwiększają bezpieczeństwo operatora, współdzielącego z robotem przestrzeń roboczą. Świadomość wspomnianych zmian, które zachodzą w przemyśle, przekłada się bezpośrednio na konieczność dostosowania metod kształcenia przyszłych inżynierów, również w zakresie implementacji i eksploatacji inteligentnych maszyn i urządzeń. W artykule przedstawiono prototypowe rozszerzenie funkcjonalności typowego chwytaka przemysłowego o możliwość percepcji otoczenia przez robota przemysłowego. Zaprezentowane rozwiązanie nie ustępuje podobnym, prezentowanym w literaturze naukowej, a jednocześnie – pod względem kosztów i nakładu pracy – pozostaje w zasięgu możliwości kół naukowych czy osób piszących prace dyplomowe. Wykonany prototyp przetestowano z użyciem robota. Forma rozwiązania pozostaje na tyle uniwersalna, że może być używana z dowolnym robotem przemysłowym, co powoduje, że może posłużyć zarówno do prowadzenia badań naukowych, jak i jako pomoc dydaktyczna podczas zajęć laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: robot, chwytak przemysłowy, inteligentny chwytak, czujniki

EXTENSION OF THE TYPICAL INDUSTRIAL GRIPPER BY FUNCTIONS RELATED TO THE PERCEPTION OF THE ENVIRONMENT

Abstract

The development of modern industry is strongly linked to the implementation of modern technologies and manufacturing methods based on the IT. The Industry 4.0 and 5.0 philosophy puts great emphasis on the implementation of intelligent solutions, with an aim to achieve decentralised systems capable of self-organisation. Also in a broader aspect, the topics of human-machine interaction, including robots, are addressed. The Industry 5.0 concept introduces advanced safety systems that use sensors in a manner that resembles human senses, which are capable of anticipating and preventing dangerous situations. Modern grippers, being an important piece of robot equipment, are equipped with sensors that not only extend the robot's ability to perceive the environment, but also increase the safety of the operator that shares the workspace with the robot. The awareness of such changes taking place in the industry results directly in the need to adapt the teaching methods used to educate the engineers of tomorrow, also regarding the exploitation and implementation of intelligent machines and devices. This paper presents the prototype of an extension for a typical industrial gripper that introduces the possibility of perception of the environment by an industrial robot. The presented solution is in line with similar ones presented in the scientific literature, and at the same time – in terms of cost and effort – remains within range of capabilities of student research groups or

individuals writing their theses. A prototype has been also tested using a robot. The form of the solution remains so versatile that it can be used with any industrial robot, making it suitable for both scientific research and as a teaching aid during laboratory classes.

Keywords: robot, industrial gripper, intelligent gripper, sensors

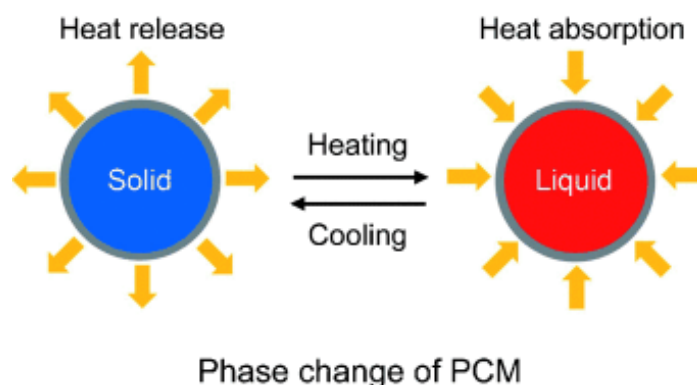
Magdalena GWÓŹDŹ¹

MATERIAŁY ZMIENNOFAZOWE DO MAGAZYNOWANIA ENERGII CIEPLNEJ OPARTE NA ZWIĄZKACH POCHODZENIA NATURALNEGO

1. Wprowadzenie

W najnowszym raporcie „Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector” [1] Międzynarodowej Agencji Energii (IEA – *International Energy Agency*) zaproponowano działania prowadzące do znacznego ograniczenia spalania paliw kopalnych i zmniejszenia emisji dwutlenku węgla, który negatywnie wpływa na zmiany klimatyczne. W raporcie założono, że w 2050 r. ok. 30% energii będzie pochodzić ze źródeł odnawialnych, głównie z energii słonecznej, a wydajność fotowoltaiki wzrośnie 20-krotnie. Takie założenia wpływają na intensyfikację badań związanych z poszukiwaniem efektywnych metod magazynowania energii cieplnej, która jest najczęściej produkowaną i transportowaną formą energii [2].

Energia cieplna może być magazynowana przy użyciu systemów wykorzystujących materiały zmiennofazowe (PCM). Są to substancje, które mogą akumulować znaczne ilości ciepła utajonego podczas przemiany fazowej (np. topnienia) i uwalniać je podczas przemiany odwrotnej (krystalizacji) [3] (rys. 1).



Rys. 1. Przemiana fazowa PCM

Fig. 1. PCM transition cycle

Źródło: Hyun D.C., Levinson N.S., Jeong U., Xia Y.: Emerging Applications of Phase-Change Materials (PCMs): Teaching an Old Dog New Tricks. *Angew. Chemie – Int. Ed.* 2014 [4].

¹ Magdalena.gwozdz@polsl.pl, Katedra Technologii Chemicznej Organicznej i Petrochemii, Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska.

Wykorzystanie PCM w systemach magazynowania energii cieplnej stało się jednym z intensywnie badanych tematów w ostatnich latach. Rynek PCM osiągnął wartość 1,66 miliona USD w 2021 r. i szacuje się, że do 2030 r. przekroczy 5,4 miliona USD, przy łącznym rocznym wzroście na poziomie 16,0% w latach 2021-2030 [5]. Intensyfikacji badań sprzyja również możliwość różnorodnych zastosowań PCM ze względu na ich szeroki zakres temperatur topnienia T_m (-50-1700°C) [6, 7].

Wyróżniamy PCM w zakresie niskich temperatur (0-100°C), które są coraz częściej wykorzystywane w odzieży i tekstyliach [8, 9] dla zapewnienia komfortu termicznego, w materiałach budowlanych (np. płytach, stropach, podłogach i betonie) [10, 11, 7] oraz do przechowywania i transportu produktów wrażliwych na temperaturę, takich jak żywność, próbki krwi i organy dawców [7, 12]. PCM o średnim zakresie temperatur (80-220°C) znalazły zastosowanie w magazynowaniu energii słonecznej i wiatrowej [13], słonecznych podgrzewaczach wody [14], odzysku ciepła odpadowego oraz organicznym cyklu Rankina [15]. PCM z zakresu wysokotemperaturowego (>220°C) służą do magazynowania energii cieplnej w elektrociepłowniach, w skoncentrowanych elektrowniach słonecznych i przemysłowych zbiornikach magazynujących energię cieplną [16].

W dziedzinie PCM wiele firm podjęło wysiłki badawczo-rozwojowe skupiając się na związkach pochodzących z biomasy. Wśród nich można wyróżnić kwasy tłuszczowe [17, 18, 19], alkohole tłuszczowe [20, 21] i alkohole cukrowe [22, 23] oraz ich pochodne takie jak amidy [24, 25, 26], estry [27, 28, 29] czy polimery [30]. Typowe organiczne PCM mają niską (<100°C) temperaturę topnienia, wysoką wartość entalpii topnienia (ΔH), wysoką stabilność chemiczną i termiczną, łatwo krystalizują i topią się w wąskich zakresach temperatur [31]. Dodatkowo są nietoksyczne i przyjazne środowisku. Do głównych ograniczeń organicznych PCM zaliczyć można palność i niską przewodność cieplną [32], które można przezwyciężyć m.in. przez stosowanie dodatków, np. grafitu/nanorurek węglowych, lub poprzez proces mikro- i nanokapsułkowania [18].

W niniejszym przeglądzie dokonano krótkiego podsumowania PCM opartych na kwasach tłuszczowych, alkoholach tłuszczowych i alkoholach cukrowych. W tym celu wybrano najważniejsze publikacje opisujące łatwe i zrównoważone modyfikacje chemiczne wybranych prekursorów oraz zależności między strukturą związków a właściwościami termicznymi.

2. Kwasy i alkohole tłuszczowe

Spośród materiałów organicznych kwasy tłuszczowe przyciągają znaczną uwagę ze względu na wysokie entalpie przemian fazowych, stabilność termiczną i brak efektu przechłodzenia (różnica między temperaturą topnienia i krystalizacji) [19]. Dodatkowo można je pozyskać z olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych, co wpływa na ich dostępność i niski

koszt. Zakres T_m kwasów tłuszczowych waha się od -5°C do 71°C , a wartości ΔH , które wyznaczono metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC), wynoszą od 45,3 do 211,8 kJ/kg (tabela 1) [17].

Tabela 1

Właściwości termofizyczne wybranych kwasów tłuszczowych

Nazwa	Wzór sumaryczny	T_m [$^{\circ}\text{C}$]	ΔH_m [kJ/kg]	Przewodność cieplna C_p [W/mK]	Gęstość ciało stałe/ciecz [kg/m ³]
Kwas kaprylowy	$\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_6-\text{COOH}$	16–16,7	148,2–149	0,145–0,149	981–1033/ 862–901
Kwas kaprynowy	$\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_8-\text{COOH}$	31,5–3	152,7–162,8	0,149–0,153	1004/ 853–886
Kwas laurylowy	$\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COOH}$	41–44,2	177,4–211,6	0,139–0,192	1007/ 848–870
Kwas mirystynowy	$\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_{12}-\text{COOH}$	49–58	186,6–204,5	0,170	990/ 844–861
Kwas palmitynowy	$\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$	55–64	163–211,8	0,103–0,172	989/ 845–850
Kwas stearynowy	$\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$	55–71	186,5–210	0,097–0,172	941–965/ 839–848
Kwas oleinowy	$\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-$ $-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$	-5,3	137,1–207,0	0,103	-

Źródło: opracowanie własne na podstawie [17, 33, 34, 35].

Jednak ze względu na korozyjność, nieprzyjemny zapach, sublimację podczas ogrzewania oraz palność [25] ogromny wysiłek wkłada się w poszukiwanie pochodnych kwasów tłuszczowych takich jak amidy lub estry w celu uzyskania PCM o korzystniejszych właściwościach. Dodatkowo niskie T_m PCM wytwarzanych z olejów roślinnych i zwierzęcych ograniczają ich zastosowania [26], dlatego dalsze modyfikacje mogą się przyczynić do poszerzenia ich zakresu aplikacyjnego.

Alkohole tłuszczowe wykazują wyższe ΔH i zbliżone T_m do kwasów tłuszczowych, jednak ich znaczącą korzyścią jest brak korozyjności i nieprzyjemnego zapachu. Stanowią one doskonałe prekursorsy w dalszej syntezie długołańcuchowych pochodnych. W literaturze są one znacznie rzadziej opisywane, a zainteresowanie nimi wzrosło w ostatnich kilku latach [36, 21]. Właściwości termiczne wybranych alkoholi cukrowych przedstawiono w tabeli 2.

Właściwości termofizyczne wybranych alkoholi tłuszczowych

Nazwa	Wzór sumaryczny	T _m [°C]	ΔH _m [kJ/g]	Gęstość w 20°C [g/ml]
Alkohol kaprylowy	H ₃ C-(CH ₂) ₇ -OH	-15	-	0,829
Alkohol kaprynowy	H ₃ C-(CH ₂) ₉ -OH	7	-	0,830
Alkohol laurylowy	H ₃ C-(CH ₂) ₁₁ -OH	24,1	213,81	0,833
tridekanol	H ₃ C-(CH ₂) ₁₂ -OH	31,6	223,0	0,822
alkohol mirystylowy	H ₃ C-(CH ₂) ₁₃ -COOH	31,6	229,55	0,824
Alkohol pentadecylowy	H ₃ C-(CH ₂) ₁₄ -COOH	43,7	237,41	0,835
Alkohol cetylowy	H ₃ C-(CH ₂) ₁₅ -COOH	49,1	238,0	-

Źródło: opracowanie własne na podstawie [36, 37, 38].

3. Pochodne kwasów tłuszczowych

3.1. Amidy

Wprowadzenie dodatkowych grup funkcyjnych takich jak NH₂ lub OH do struktury związku wyjściowego może wpływać na wzrost T_m i ΔH najprawdopodobniej ze względu na zwiększoną liczbę międzycząsteczkowych i wewnątrzcząsteczkowych wiązań wodorowych i oddziaływań van der Waalsa [26]. Cemil Alkan i współpracownicy otrzymali serię diamidów: etylenodilauroilu, etylenodimirystoilu i etylenodipalmitoilu, przez kondensację etylenodiaminy z odpowiednimi kwasami tłuszczowymi. T_m tych PCM mieściły się w zakresie od 38,5°C do 52,5°C. Otrzymane związki miały ΔH nawet do 150,66 J/g dla etylenodipalmitoilu i pozostawały stabilne aż w 1000 cyklach topnienia i krystalizacji, co czyni je obiecującym kandydatem jako PCM.

Syntezę kolejnych amidów pochodzących z kwasów tłuszczowych oraz analizę wpływu struktury otrzymanych produktów na właściwości termiczne opisała Kosheela D. Poopalam wraz ze współpracownikami [25, 39, 26].

Monoamidy zsyntezowano w reakcji kwasu tłuszczowego (kwasu kaprylowego, kwasu laurylowego, kwasu mirystynowego, kwasu palmitynowego i kwasu stearynowego) i aminy tłuszczowej (heksadecyloaminy, oktadecyloaminy) [25]. Reakcję prowadzono w 160-170°C przez 2 h. Wprowadzenie grupy amidowej do struktury liniowych, nasyconych kwasów tłuszczowych skutkowało zwiększeniem oddziaływań międzycząsteczkowych, a tym samym

wzrostem T_m (79-96°C), ΔH (155-201 J/g), stabilności termicznej oraz wydajności otrzymanych monoamidów. Korzystne wartości termiczne produktów przypisywano występowaniu silnych wiązań wodorowych wspieranych przez oddziaływania van der Waalsa występujące w długich łańcuchach alkilowych. Dodatkowo potwierdzono, że stabilność cykliczna monoamidów jest ściśle związana ze strukturą krystaliczną, na którą duży wpływ miała symetria cząsteczki względem grupy amidowej.

W kolejnym badaniu otrzymano szereg liniowych diamidów alifatycznych przez bezpośrednią reakcję kwasu stearynowego z diaminami o parzystej liczbie atomów węgla (1,2-etanodiaminą, 1,4-butanodiaminą, 1,6-heksylo-diaminą, 1,8-oktanodiaminą i 1,10-dekanodiaminą) [39]. Diamidy miały T_m w zakresie 138-152°C oraz $\Delta H \sim 220$ J/g – maksimum dla N,N'-(butano-1,4-diylo)distearamidu. Dodatkowo proces cyklicznego topnienia i krystalizacji zachodził w wąskim zakresie temperatur (<5°C) bez efektu przechłodzenia nawet 100 razy dla N,N'-(heksan-1,6-diylo)distearamidu.

W jednej z najnowszych publikacji Kosheela D. Poopalam rozszerzyła zakres poprzednich badań o szeregi diamidów, wykorzystując kwas laurynowy, kwas mirystynowy i kwas palmitynowy w reakcji z wybranymi poprzednio diaminami (z wyjątkiem 1,6-heksanodiaminy) [26]. Stwierdzono, że przewodność cieplna otrzymanych związków jest wyższa w porównaniu z najczęściej opisywanymi parafinami, co można przypisać znacznemu udziałowi wiązań wodorowych [40]. Dodatkowo diamidy mające tę samą masę, ale różniące się strukturą, mają różne właściwości termiczne. Wpływa na to m.in długość łańcucha diaminy. Uogólniając, zwiększenie odległości grup amidowych sprzyja tworzeniu oddziaływań van der Waalsa, jednak osłabia wiązania wodorowe stabilizujące cząsteczkę, powodując spadek T_m .

Daniela Betancourt-Jimenez i inni wykorzystali komercyjnie dostępne oleje roślinne (olej słonecznikowy, olej kokosowy i olej kukurydziany) i pierwszorzędowe aminy alifatyczne (butyloaminy, dodecyloaminy, heksadecyloaminy) w łatwej i przyjaznej środowisku syntezie długołańcuchowych amidów [24]. T_m otrzymanych produktów rosła wraz z długością łańcucha aminy (osiągając 83,1°C dla amidu z oleju palmowego i heksadodecyloaminy). Podobną tendencję zaobserwowano dla entalpii topnienia, z wyjątkiem amidów otrzymanych z heksadecyloaminy. Entalpia topnienia zsyntetyzowanych materiałów wynosiła 51-141 kJ/kg, a wszystkie produkty były stabilne termicznie do 200°C. Co najważniejsze, wykorzystanie olejów roślinnych składających się z mieszaniny kwasów o różnych długościach łańcucha i stopniach nienasycenia w większości przypadków skutkowało otrzymaniem amidów wykazujących pojedynczy pik topnienia i krystalizacji, co wyeliminowało potrzebę rozdzielania produktów. Wyniki sugerują, że chociaż amidy mają różne struktury chemiczne, oddziałują ze sobą i/albo zestalają się w tę samą strukturę krystaliczną/kilka struktur krystalicznych o podobnych T_m . Czynnikiem sprzyjającym kokrystalizacji może być wpływ wiązań wodorowych grupy amidowej, który rekompensuje różnice nienasycenia otrzymanych amidów.

3.2. Estry

Estry, podobnie jak amidy, nie wykazują korozyjności, są nietoksyczne, nie powodują efektu przechłodzenia oraz są stabilne termicznie i chemicznie, ale cechują się większym kosztem. Wiązanie estrowe utworzone między kwasami tłuszczowymi i alkoholami zwiększa ΔH i obniża T_m w porównaniu z czystymi kwasami tłuszczowymi [29].

W jednym z pierwszych przeprowadzonych badań [41] otrzymano serię pochodnych kwasów tłuszczowych przez estryfikację różnych handlowo dostępnych mieszanin kwasu stearynowego i palmitynowego alkoholami: metylovym, butylovym i propylovym, a właściwości termiczne estrów określono metodą DSC. Produkty oczyszczono przez rekrytalizację. Wykazano T_m estrów w przedziale 17–34°C, a ΔH osiągnęła maksimum (199 J/g) dla stearynianu metylu. Można zauważyć, że ΔH zmniejsza się wraz ze wzrostem długości łańcucha węglowego alkoholi.

Aydin i inni otrzymali szeroką gamę estrów tłuszczowych, wykorzystując alkohol mirystylovym (C14) i cetylovym (C16) oraz kwasy o długości łańcucha od C10-C20 [42, 43, 44]. Reakcja przebiegała bez udziału katalizatora pod zmniejszonym ciśnieniem. Podobne właściwości termiczne, T_m (38-53°C) i wartości entalpii powyżej 200 kJ/kg obserwuje się w przypadku wysokołańcuchowych estrów kwasów tłuszczowych alkoholu mirystylovego zarówno o parzystej, jak i nieparzystej liczbie atomów węgla. Wszystkie estry mają znikomy efekt przechłodzenia, wysoką stabilność termiczną oraz topią się i krystalizują w wąskim zakresie temperatur.

Stwierdzono, że T_m amidów otrzymanych z kwasów tłuszczowych o nieparzystej liczbie atomów węgla wzrasta wraz ze wzrostem długości łańcucha węglowego, z wyjątkiem temperatur estrów palmitynianu mirystylu i heptadodekanianu mirystylu [43]. Maksymalna ΔH wynosi 221,80 kJ/kg dla stearynianu mirystylu i spada do 203,23 i 201,34 kJ/kg odpowiednio dla nonadekanianu mirystylu i eikozanianu mirystylu.

Uzupełnieniem badań była analogiczna synteza estrów z wykorzystaniem kwasów tłuszczowych o parzystej liczbie węgli i alkoholu cetylovym [44], których T_m wynosiły 29-60°C, a ΔH były nieco niższe niż dla poprzednich serii, osiągając 226 kJ/kg [42]. Wszystkie estry pozostawały stabilne w 1000 cykli topnienia i krystalizacji.

M.C. Floros i S.S. Narine [45] zaproponowali nową, bezrozpuszczalnikową syntezę 24 zrównoważonych diestrów, wykorzystując jako substraty estry kwasów tłuszczowych (stearynian metylu, palmitynian metylu, mirystynian metylu i laurynian metylu) i liniowe dialkohole (glikol etylenowy – 1,10-dekanodiol). Otrzymane związki miały temperatury topnienia w zakresie 39-77°C. Diestry o najniższej ($n = 2$ i $n = 3$) i najwyższej ($n = 9$ i $n = 10$) liczbie atomów węgla pomiędzy grupami estrowymi wykazują najwyższe T_m , a diestry o $n = 5$ (dla związków o nieparzystej liczbie atomów węgla) i $n=6$ (dla związków o parzystej liczbie

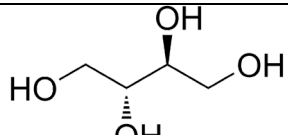
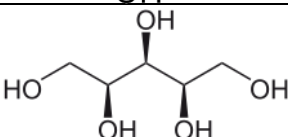
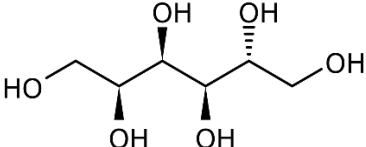
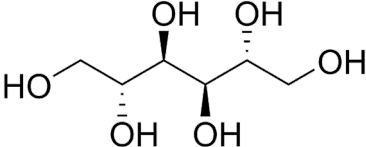
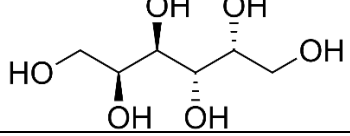
atomów węgla) cechują najniższe T_m . Zależności te wynikają z zawady sterycznej, która w przypadku zbyt małej odległości między grupami estrowymi ogranicza swobodną rotację wiązań, zwiększając barierę energetyczną. W diestrach 1,9-nonanodiolu grupy estrowe są wystarczająco daleko od siebie, aby ograniczyć wpływ zawady sterycznej na T_m , która wówczas wzrasta wraz ze wzrostem długości łańcucha dialkoholou z powodu rosnących oddziaływań van der Waalsa. ΔH wahały się od 230 do 260 J/g.

R. Ravotti i współpracownicy otrzymali estry pentyłowe kwasu mirystynowego, palmitynowego, stearynowego, arachidowego i behenowego oraz arachidynian metylu i decylu przez estryfikację Fischera z użyciem kwasowego katalizatora [27]. Stwierdzono, że arachidan metylu i decylu mają ΔH powyżej 200 J/g, podczas gdy estry pentyłowe wykazywały niższe wartości, ale wciąż powyżej 150 J/g. T_m estrów mieściły się w zakresie od 10°C do 48°C. Estry z parzystą liczbą atomów węgla wykazują większą T_m w porównaniu z estrami o nieparzystej liczbie węgli. Nazywane jest to efektem „nieparzysto-parzysty”, wynikającym z faktu, że w strukturach parzystych wiązania z grupą estrową są symetryczne, podczas gdy w strukturach nieparzystych są one ustawione pod kątem 112°.

3.2.1. Estry alkoholi cukrowych

Obecnie systemy solarne są najszybciej rozwijającą się technologią pod względem ilości dostarczanej energii elektrycznej i cieplnej (w 2021 r. ilość energii z fotowoltaiki przekroczyła 1 000 TWh [46]). Dlatego rozwój zrównoważonych, tanich i łatwo dostępnych PCM mających temperaturę topnienia w zakresie 100-220°C jest integralną częścią efektywnych systemów do magazynowania energii słonecznej. W tym zakresie dużym zainteresowaniem cieszą się m.in. ciecze jonowe [47, 48, 49], które cechuje niska lotność, niska palność oraz dobra stabilność termiczna i chemiczna, wraz z możliwością dostrojenia ich właściwości chemicznych i fazowych. Z kolei alkohole cukrowe, które mają wysoką entalpię topnienia (najwyższą spośród związków wykazujących temperaturę topnienia 100-220°C), niską cenę, brak toksyczności i korozyjności, przyciągają szczególną uwagę jako materiał pochodzący z biomasy. Do najistotniejszych ograniczeń alkoholi cukrowych, utrudniających ich wykorzystanie w czystej postaci w celu magazynowania energii cieplnej, należą: niska stabilność termiczna, problemy z krystalizacją i znaczny efekt przechłodzenia.

Właściwości termofizyczne wybranych alkoholi cukrowych

Nazwa	Wzór sumaryczny	T_m [°C]	ΔH_m [kJ/kg]	C_p [W/mK]
erytrytol		119	334	0,39
ksylitol		93,1	231	0,44
sorbitol		97	184	0,59
mannitol		166	277	0,28
galaktitol		187	351	-

Źródło: opracowanie własne na podstawie [40, 50, 51]

Sari i inni opracowali serię estrów kwasów tłuszczowych alkoholi polihydroksylowych, takich jak: glicerol [52], erytrytol [53], ksylitol [54], galaktitol [55] i mannitol [56], niewykazujących nieprzyjemnego zapachu, korozyjności oraz efektu przechłodzenia. Wszystkie produkty otrzymano w reakcji estryfikacji odpowiedniego chlorku kwasowego i alkoholu, a właściwości termiczne otrzymanych związków scharakteryzowano za pomocą analizy DSC i TGA.

Temperatury topnienia i entalpie topnienia tetrapalmitynianu erytrytolu i tetrasterarynianu erytrytolu wynosiły 21,93°C i 30,35°C oraz odpowiednio 201,10 i 208,84 J/g.

W serii pentapalmitynianu ksylitolu i penstearynianu ksylitolu temperatury topnienia wynosiły 18,75°C i 32,35°C, podczas gdy ich wartości entalpii topnienia określono jako 170,05 J/g i 205,65 J/g.

Z kolei heksapalmitynian galaktitolu i heksastearynian galaktitolu miały temperatury topnienia kolejno 31,78°C i 47,79°C oraz entalpie topnienia 201,66 J/g i 251,05 J/g. Dla heksalaurynianu mannitolu, heksamirystynianu mannitolu heksapalmitynianu mannitolu i heksastearynianu mannitolu stwierdzono, że oprócz wysokiej wartości entalpii topnienia między 145 J/g a 202 J/g i zakresu temperatur topnienia 42–65°C wykazują niewielki efekt przechłodzenia (1–8°C).

Test cyklicznego ogrzewania i chłodzenia wykazał, że przygotowane PCM miały dobrą stabilność termiczną nawet po 1000 cyklach topnienia i krystalizacji. Stwierdzono też ogólną zależność wzrostu temperatury topnienia i entalpii topnienia wraz z wydłużaniem łańcucha alkilowego kwasów tłuszczowych w obszarze każdej z syntezowanych serii związków. Autorzy zaproponowali również możliwość zwiększenia przewodności cieplnej dla estrów kwasów tłuszczowych galaktitolu, mannitolu i erytrytolu (nawet o około 53,3% dla heksastearynianu galaktitolu) przez dodanie 5-10 % wag. ekspandowanego grafitu. Co ciekawe, estry analogicznych kwasów tłuszczowych i alkoholi cukrowych o tej samej liczbie atomów węgla, ale różnym rozmieszczeniu grup hydroksylowych w przestrzeni (mannitol, galaktitol) charakteryzują się różnymi wartościami entalpii topnienia i temperatury topnienia.

Wnioski te zostały potwierdzone i szerzej opisane w pracy W. Wei i współpracowników [57], w której otrzymano serię monoestrów alkoholi cukrowych z kwasem behenowym o ultradługich łańcuchach w enzymatycznej reakcji z alkoholami cukrowymi: glikolem etylenowym (1), glicerolem (2), erytrytolem (3a), pentaerytrytolem (3b), arabitolem (4a), ksylitolem (4b) i sorbitolem (5). Stwierdzono, że wraz ze wzrostem T_m w kolejności $1 < 3b < 4b \leq 2 < 3a < 4a < 5$ ΔH maleje. Dokładna analiza pozwala stwierdzić, że ten zmieniający się trend można skorelować ze strukturą alkoholu cukrowego, w której grupy OH umożliwiają tworzenie wewnątrz- i międzycząsteczkowych wiązań wodorowych. Na przykład związki erytrytolu 3a i pentaerytrytolu 3b mają taką samą liczbę jednostek OH, jednak struktura pentaerytrytolu sprzyja tworzeniu wewnątrzcząsteczkowego wiązania H, a erytrytolu międzycząsteczkowego wiązania H, co może wyjaśniać wyższą T_m związku 3a. Czynnikiem determinującym zmianę T_m są również oddziaływania van der Waalsa w łańcuchu kwasu behenowego i między kwasem behenowym a alkoholem cukrowym. Co ciekawe, ksylitol w związku 4b i glicerol w związku 2 mimo różnej liczby grup OH mają prawie taką samą T_m . Najprawdopodobniej większa liczba grup OH zwiększa liczbę oddziaływań wiązań H, ale rosnąca objętość polarnych grup zaburza międzycząsteczkowe rozmieszczenie łańcuchów alkilowych, a tym samym osłabia oddziaływanie van der Waalsa. Ten sam wniosek wyjaśnia spadek ΔH wraz ze wzrostem liczby grup OH. Kompleksowe podsumowanie zależności między budową molekularną a właściwościami termicznymi (temperatura topnienia i entalpia topnienia) dla około 200 związków organicznych opisano również w przeglądzie[58].

Wyniki te sugerują, że zrozumienie wpływu struktury otrzymanych PCM na właściwości termiczne ma kluczowe znaczenie w projektowaniu efektywnych PCM.

4. Podsumowanie

Obecnie, ze względu na rosnącą świadomość ekologiczną i konieczność zmniejszania śladu węglowego, wzrosło znaczenie odnawialnych źródeł energii i przemysłowego odzysku ciepła odpadowego. Systemy magazynowania energii cieplnej wykorzystujące PCM są najlepszym

rozwiązaniem, umożliwiającym zapewnienie równowagi między zużyciem a zapotrzebowaniem na energię.

Dzięki doskonałym właściwościom chemicznym i termofizycznym biomateriały zmiennofazowe przyciągają uwagę w zakresie zastosowań w niskich i średnich temperaturach. Dostępność, nietoksyczność i biodegradowalność sprawiają, że zrównoważone PCM pochodzące z biomasy posiadają szeroki potencjał aplikacyjny o czym świadczy ich handlowe wykorzystanie w transporcie, tekstyliach czy medycynie przez firmę Croda [59]. Niektórzy naukowcy zwracają jednak uwagę, że wykorzystanie jadalnej biomasy może stanowić potencjalne zagrożenie dla zasobów żywności na świecie, dlatego zalecają stosowanie niejadalnych lub odpadowych prekursorów, aby uniknąć ryzyka [60].

Wśród wielu prekursorów na szczególną uwagę zasługują kwasy tłuszczowe, alkohole tłuszczowe i alkohole cukrowe oraz ich pochodne, na których skupia się niniejszy przegląd. Posiadają one wysokie entalpie topnienia (nawet do 350 J/g) oraz stabilność termiczną nawet do 1000 cykli topnienia i krystalizacji. Wykorzystanie korelacji pomiędzy strukturą chemiczną i właściwościami termicznymi ma istotne znaczenie, ponieważ może pozwolić na opracowanie skutecznych narzędzi zdolnych do przewidywania struktury chemicznej potrzebnej do osiągnięcia efektywnych PCM dla określonych zastosowań [27]. Jest to jednak skomplikowane zadanie, dlatego konieczne są dalsze szczegółowe badania w tym kierunku.

Bibliografia

1. IEA.: Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. *Int. Energy Agency* 2021.
2. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/heating>, [dostęp: 03.04.2023 r.]
3. Farid M.M., Khudhair A.M., Razack S.A.K., Al-Hallaj, S.: A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Convers. Manag.* 2004.
4. Hyun D.C., Levinson N.S., Jeong, U., Xia, Y.: Emerging Applications of Phase-Change Materials (PCMs): Teaching an Old Dog New Tricks. *Angew. Chemie – Int. Ed.* 2014.
5. <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/phase-change-materials-market>, dostęp 03.04.2023r.
6. Du K., Calautit J., Wang Z., Wu Y., Liu H.: A Review of the Applications of Phase Change Materials in Cooling , Heating and Power Generation in Different Temperature Ranges. *Appl. Energy* 2018.
7. Mehling H., Brütting M., Haussmann T.: PCM Products and Their Fields of Application – An Overview of the State in 2020/2021. *J. Energy Storage* 2022.
8. Nelson G.: Microencapsulation in Textile Finishing, 2001.
9. Korte J.Q., De Bongers C.C.W.G., Catoire M., Boris, R. M., Eijsvogels, T. M. H.: Cooling Vests Alleviate Perceptual Heat Strain Perceived by COVID-19 Nurses. *Temperature* 2021.

10. Ikutegbe C.A., Farid M.M.: Application of Phase Change Material Foam Composites in the Built Environment : A Critical Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020.
11. Lizana J., Chacartegui R., Barrios-Padura A., Ortiz C.: Advanced Low-Carbon Energy Measures Based on Thermal Energy Storage in Buildings : A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017.
12. Oró E., Gracia A. De, Castell A., Farid M.M., Cabeza L.F.: Review on Phase Change Materials (PCMs) for Cold Thermal Energy Storage Applications. 2012.
13. Hatamleh R.I., Abu-Hamdeh N.H., Khoshaim A., Alzahrani M.A.: Engineering Analysis with Boundary Elements Using Phase Change Material (PCM) to Improve the Solar Energy Capacity of Glass in Solar Collectors by Enhancing Their Thermal Performance via Developed MD Approach. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 2022.
14. Seddegh S., Wang X., Henderson A.D., Xing Z.: Solar Domestic Hot Water Systems Using Latent Heat Energy Storage Medium : A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015.
15. Matuszek K., Kar M., Pringle J.M., Macfarlane D.R.: Phase Change Materials for Renewable Energy Storage at Intermediate Temperatures.
16. Zhou C., Wu S.: Medium – and High – Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage : Material Database, System Review, and Corrosivity Assessment. 2018.
17. Jankowski N.R., McCluskey F.P.: A Review of Phase Change Materials for Vehicle Component Thermal Buffering. *Appl. Energy.* 2014.
18. Pereira da Cunha J., Eames P.: Thermal Energy Storage for Low and Medium Temperature Applications Using Phase Change Materials – A Review. *Appl. Energy.* 2016.
19. Yuan Y., Zhang N., Tao W., Cao X., He, Y.: Fatty Acids as Phase Change Materials : A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014.
20. Sharma R.K., Sarl A., Hekimoğlu G., Zahir M.H., Tyagi V.V.: Effects of Thermal Cycling Operation on Solar Thermal Energy Storage, Morphology, Chemical/Crystalline Structure, and Thermal Degradation Properties of Some Fatty Alcohols as Organic PCMs. *Energy and Fuels.* 2020.
21. Zhang Q., Yan H., Zhang Z., Luo J., Yin N., Tan Z., Shi Q.: Thermal Analysis and Heat Capacity Study of Even-Numbered Fatty Alcohol (C₁₂H₂₅OH-C₁₈H₃₇OH) Phase-Change Materials for Thermal Energy Storage Applications. *Mater. Today Sustain.* 2021.
22. Ali, H. M.: Phase Change Materials Based Thermal Energy Storage for Solar Energy Systems. *J. Build. Eng.* 2022.
23. Solé A., Neumann H., Niedermaier S., Martorell I., Schossig P., Cabeza L.F.: Stability of Sugar Alcohols as PCM for Thermal Energy Storage. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2014.
24. Betancourt-Jimenez D., Youngblood J.P., Martinez C.J.: Synthesis and Characterization of Fatty Acid Amides from Commercial Vegetable Oils and Primary Alkyl Amines for Phase Change Material Applications. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2020.
25. Poopalam K.D., Raghunanan L., Bouzidi L., Yeong S.K., Narine S.S.: Lipid-Derived Monoamide as Phase Change Energy Storage Materials. *Int. J. Energy Res.* 2019.

26. Poopalam K.D., Raghunanan L., Bouzidi L., Yeong S.K., Narine S.S.: Aliphatic Fatty Diamide as Renewable Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *J. Energy Storage* 2021.
27. Ravotti R., Fellmann O., Lardon N., Fischer L.J., Stamatiou A., Worlitschek J.: Analysis of Bio-Based Fatty Esters PCM's Thermal Properties and Investigation of Trends in Relation to Chemical Structures. *Appl. Sci.* 2019.
28. Alferez Luna M.P., Neumann H., Gschwander S.: Stability Study of Erythritol as Phase Change Material for Medium Temperature Thermal Applications. *Appl. Sci.* 2021.
29. Ravotti R., Fellmann O., Lardon N., Fischer L.J., Stamatiou A., Worlitschek J.: Synthesis and Investigation of Thermal Properties of Highly Pure Carboxylic Fatty Esters to Be Used as PCM. *Appl. Sci.* 2018.
30. Review B.A., Nazari M., Jebrane M.: Bio-Based Phase Change Materials Incorporated in Lignocellulose Matrix for Energy Storage In. 2020.
31. Socaciu L., Pleșa A., Ungureșan P., Giurgiu O.: Review on Phase Change Materials for Building Applications. *Leonardo Electron. J. Pract. Technol.* 2014.
32. Mofijur M., Mahlia T.M.I., Silitonga A.S., Ong H.C., Silakhori M., Hasan M.H., Putra N., Ashrafur Rahman S.M.: Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview. *Energies.* 2019.
33. Kenisarin M., Mahkamov K.: Solar Energy Storage Using Phase Change Materials. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2007.
34. Zhong J.Q., Fragoso A.T., Wells A.J., Wettlaufer J.S.: *Finite-Sample-Size Effects on Convection in Mushy Layers*; 2012; Vol. 704.
35. Abouei A., Karimi-maleh H., Naddafi M., Karimi F.: Application of Bio-Based Phase Change Materials for Effective Heat Management. *J. Energy Storage.* 2023.
36. Sharma R.K., Sari A., Hekimo G., Zahir H., Tyagi V.V.: Batteries and Energy Storage Effects of Thermal Cycling Operation on Solar Thermal Energy Storage, Morphology , Chemical/Crystalline Structure, Thermal Degradation Properties of Some Fatty Alcohols as Organic PCMs Morphology , Chemical/Crystalline S. 2020.
37. Kenisarin M.M.: ScienceDirect Thermophysical Properties of Some Organic Phase Change Materials for Latent Heat Storage . A Review. *Sol. ENERGY.* 2014.
38. Miltenburg J.C. Van, Berg G.J.K. Van Den, Ramirez M.: Heat Capacities and Derived Thermodynamic Functions of 1-Dodecanol and 1-Tridecanol between 10 K and 370 K and Heat Capacities of 1-Pentadecanol and 1-Heptadecanol between 300 K and 380 K and Correlations for the Heat Capacity and the Entropy of Liquid N. 2003.
39. Poopalam K.D., Raghunanan L., Bouzidi L., Yeong S.K., Narine S.S.: The Anomalous Behaviour of Aliphatic Fatty Diamides: Chain Length and Hydrogen Bonding Interactions. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2019.

40. del Barrio E.P., Godin A., Duquesne M., Daranlot J., Jolly J., Alshaer W., Kouadio T., Sommier A.: Characterization of Different Sugar Alcohols as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage Applications. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2017.
41. Feldman D., Banu D., Hawes D.: Low Chain Esters of Stearic Acid as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Buildings. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 1995.
42. Alper A., Okutan H.: Solar Energy Materials & Solar Cells High-Chain Fatty Acid Esters of Myristyl Alcohol with Even Carbon Number : Novel Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage – 1. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2011.
43. Alper A., Okutan H.: Solar Energy Materials & Solar Cells High-Chain Fatty Acid Esters of Myristyl Alcohol with Odd Carbon Number : Novel Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage – 2. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2011.
44. Alper A., Aydın A.: Solar Energy Materials & Solar Cells High-Chain Fatty Acid Esters of 1-Hexadecanol for Low Temperature Thermal Energy Storage with Phase Change Materials. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2012.
45. Floros M.C., Narine S.S.: Latent Heat Storage Using Renewable Saturated Diesters as Phase Change Materials. *Energy*. 2016.
46. <https://www.iea.org/reports/solar-pv>, [dostęp: 3.04.2023 r.]
47. Matuszek K., Hatton C., Kar M., Pringle J.M., MacFarlane D.R.: Molecular Patterns in the Thermophysical Properties of Pyridinium Ionic Liquids as Phase Change Materials for Energy Storage in the Intermediate Temperature Range. *J. Non-Crystalline Solids X*. 2022.
48. Matuszek K., Vijayaraghavan R., Kar M., Mahadevan S., MacFarlane D.R.: Guanidinium Organic Salts as Phase-Change Materials for Renewable Energy Storage. *ChemSusChem* 2021.
49. Samantha L. Piper, Mega Kar, Douglas R. MacFarlane, K.M. and J.M.P.: Ionic Liquids for Renewable Thermal Energy Storage – a Perspective. *Green Chem*. 2022.
50. Solé A., Neumann H., Niedermaier S., Cabeza L.F., Palomo E.: Thermal Stability Test of Sugar Alcohols as Phase Change Materials for Medium Temperature Energy Storage Application. *Energy Procedia* 2014.
51. Turunen K., Yazdani M.R., Sepp A.: Solar Energy Materials and Solar Cells " 1 A. 2022.
52. Sar A., Biçer A., Karaipekli A.: Synthesis, Characterization , Thermal Properties of a Series of Stearic Acid Esters as Novel Solid – Liquid Phase Change Materials. 2009.
53. Eroglu R., Etp E.: Synthesis and Thermal Energy Storage Properties of Erythritol Tetrastearate and Erythritol Tetrapalmitate. 2011.
54. Sarı A.: Solar Energy Materials & Solar Cells Synthesis and Thermal Energy Storage Properties of Xylitol Pentastearate and Xylitol Pentapalmitate as Novel Solid – Liquid PCMs. 2012.
55. Sarı A., Bic A.: Solar Energy Materials & Solar Cells Thermal Energy Storage Properties and Thermal Reliability of Some Fatty Acid Esters / Building Material Composites as Novel Form-Stable PCMs. 2012.

56. Sari A.: Thermal Energy Storage Properties of Mannitol – Fatty Acid Esters as Novel Organic Solid – Liquid Phase Change Materials. *Energy Convers. Manag.* 2012.
57. Wei W., Feng F., Perez B., Guo Z.: Biocatalytic Synthesis of Ultra-Long-Chain Fatty Acid Sugar Alcohol Monoesters. 2015.
58. Kahwaji S., White M.A.: Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage : 2021.
59. <https://www.pcm-ral.org/pcm/en/quality-association-pcm/> [dostęp: 03.04.2023 r.]
60. Okogeri O., Stathopoulos V.N.: What about Greener Phase Change Materials? A Review on Biobased Phase Change Materials for Thermal Energy Storage Applications. *Int. J. Thermofluids* 2021.

MATERIAŁY ZMIENNOFAZOWE DO MAGAZYNOWANIA ENERGII CIEPLNEJ OPARTE NA ZWIĄZKACH POCHODZENIA NATURALNEGO

Streszczenie

W ostatnich latach obserwuje się wzmożone zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepłą oraz ograniczoną dostępność paliw kopalnych, co wpływa na intensyfikację badań nad wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii, takich jak energia wiatrowa czy słoneczna. Materiały zmiennofazowe (PCM) zdolne do magazynowania lub uwalniania znacznych ilości ciepła utajonego podczas przemiany fazowej (np. topnienia i krystalizacji) mogą zostać wykorzystane do: magazynowania energii odnawialnej i ciepła odpadowego, ogrzewania i chłodzenia budynków czy przechowywania i transportu produktów wrażliwych na temperaturę. Wśród takich materiałów w szczególności interesujące są organiczne PCM (pochodne kwasów tłuszczowych, alkoholi tłuszczowych i alkoholi cukrowych) ze względu na stabilność chemiczną i termiczną, wysoką wartość entalpii przemiany fazowej, odporność na korozję, zrównoważony charakter prekursorów, dostępność i niski koszt.

W niniejszej pracy dokonano krótkiego podsumowania PCM opartych na kwasach tłuszczowych, alkoholach tłuszczowych i alkoholach cukrowych oraz zależności między budową molekularną a właściwościami termicznymi. W tym celu wybrano najważniejsze publikacje opisujące łatwe i zrównoważone modyfikacje chemiczne wybranych prekursorów. Wyniki sugerują, że zrozumienie wpływu struktury otrzymanych PCM na właściwości termiczne ma kluczowe znaczenie w projektowaniu efektywnych PCM dla konkretnych zastosowań.

Słowa kluczowe: magazynowanie energii cieplnej, materiały zmiennofazowe, prekursorzy z biomasy

BIOMASS DERIVED PHASE CHANGE MATERIALS FOR STORING THERMAL ENERGY

Abstract

In recent years, there has been an increased demand for electricity and heat as well as limited availability of fossil fuels, which intensifies research on the use of renewable energy sources, such as wind or solar energy. Phase Change Materials (PCMs) capable of storing or releasing significant amounts of latent heat during phase transitions (e.g. melting and crystallization) can be used for: storage of renewable energy and waste heat, heating and cooling of buildings, or storage and transport of sensitive products temperature. Among such materials, in particular, organic PCMs (derivatives of fatty acids, fatty alcohols and sugar alcohols) are of interest due to their chemical and thermal stability, high phase transition enthalpy, corrosion resistance, precursor sustainability, availability and low cost.

In this paper, a brief summary of PCMs based on fatty acids, fatty alcohols and sugar alcohols and the relationship between molecular structure and thermal properties has been made. For this purpose, the most important publications describing easy and sustainable chemical modifications of selected precursors were selected. The results suggest that understanding the influence of the structure of the obtained PCMs on thermal properties is crucial in designing effective PCMs for specific applications.

Keywords: thermal energy storage, phase change materials, biomass precursors

Grzegorz HANUS¹, Gabriel KOST²

SYSTEM ZARZĄDZANIA AUTOMATYKĄ DOMOWĄ ZA POMOCĄ STEROWNIKA PLC

1. Wstęp

W obecnych czasach dążymy do zapewnienia sobie komfortu i wygody przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa oraz równowagi życia. Takim szczególnym miejscem jest dom. Głównym celem inteligentnego domu jest zwiększenie komfortu życia ludzi i charakteryzuje się wysokim stopniem automatyzacji i integracji, odciąża ludzi od wielu zadań oraz przewiduje ich oczekiwania i potrzeby, umożliwiając m.in. zdalne sterowanie i zarządzanie oświetleniem, energią czy sprzętem AGD z dowolnego miejsca na świecie. Możliwości te wynikają z zaawansowanej technologii, takiej jak BMS (Building Management System), IBMS (Integrated Building Management System) IIBMS (Intelligent Integrated Building Management System) lub ze zintegrowanego systemu tych technologii. Niestety specjalne systemy sterowania domem są ograniczone do funkcjonalności zapewnianej przez konkretnego producenta i nie zapewniają wzajemnej kompatybilności układów, którymi sterują. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie sterownika PLC do integracji wszystkich składników inteligentnego domu, co pozwala na elastyczność i znacznie większy zakres sterowania poszczególnymi elementami domu przy jednoczesnej oszczędności pieniędzy.

2. Cechy inteligentnego domu

Inteligentny dom to, najprościej mówiąc, sieć czujników rozmieszczonych w całym domu, które są podłączone do centralnego systemu sterowania. System ten może podejmować wiele decyzji dotyczących np.: otwierania okien, rozpoczęcia podlewania podwórka przed domem

¹ grzehan128@student.polsl.pl, Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/>.

² gabriel.kost@polsl.pl, RMT2, Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/>.

lub uruchomienia ochrony przeciwpożarowej, a także pozwala na bardziej zaawansowane możliwości, takie jak: sterowanie klimatyzacją na podstawie wilgotności i temperatury w pomieszczeniach czy wysyłanie powiadomień na telefon do właściciela, gdy wykryje ruch w domu pod jego nieobecność.

Systemy te są skoordynowane w celu maksymalizacji: wydajności technicznej oszczędności kosztów i elastyczność konfiguracji [2]. Krótko mówiąc, inteligentny budynek to określenie zaawansowanego technicznie budynku, mającego zapewnić użytkownikowi komfort i bezpieczeństwo z możliwością dostosowania do nowych potrzeb, które pojawiają się wraz z biegiem czasu przy jak najmniejszych kosztach eksploatacji.

Istnieją dwa podstawowe typy systemów automatyki domowej. Są to systemy:

- a) zamknięte, które charakteryzują się możliwością kontrolowania wszystkich swoich urządzeń (podsystemów) za pomocą jednego interfejsu komunikacji o ściśle zdefiniowanej i niezmiennej konfiguracji,
- b) otwarte, składające się z centralnego koncentratora i wielu dodatkowych portów do dodawania dodatkowych urządzeń.

3. Założenie i cel pracy

W prezentowanej pracy omówiono przykład otwartego systemu sterowania strukturą inteligentnego domu za pomocą sterownika PLC.

Głównym założeniem pracy było opracowanie programu sterownika PLC, pełniącego funkcję głównego koncentratora systemu sterowania, który będzie obsługiwać inteligentny dom. Program ten jest odpowiedzialny za komunikację z różnymi urządzeniami i elementami inteligentnego domu, takimi jak czujniki ruchu, przełączniki, termostaty, rolety itp., a także za zarządzanie ich pracą. Program sterownika będzie wspomagany specjalistycznym oprogramowaniem, umożliwiającym wizualizację całego domu. Dzięki temu będzie można łatwo i wygodnie sprawdzać stan poszczególnych urządzeń i elementów inteligentnego domu oraz zarządzać ich pracą, a także wizualizować dane i statystyki dotyczące pracy całego systemu. Celem takiego rozwiązania jest pokazanie możliwości, jakie daje sterownik PLC wykorzystywany w otwartym systemie, w zakresie programowania inteligentnego domu.

W programie sterującym systemem zostały zawarte wszystkie najważniejsze funkcje dla inteligentnych domów, pominięte zaś zostały mniej ważne funkcje, takie jak: sterowanie urządzeniami RTV AGD czy nawadnianie ogrodu, które dzięki możliwości łatwej rozbudowy systemu będzie można dodawać w każdym momencie. Zaprogramowany system sterowania inteligentnego domu będzie więc wyposażony w funkcje sterowania: oświetleniem (w każdym pomieszczeniu, w ogrodzie, w tym sterownie oświetleniem basenu), temperaturą grzejników

z wykorzystaniem termostatów oraz regulatora PID, roletami, systemem antywłamaniowym i przeciwpożarowym, otwieraniem oraz zamykaniem bramy garażowej i bramy wjazdowej na posesję.

W celu wizualizacji pracy systemu opracowano również panel sterowania inteligentnym domem, z którego mieszkańcy będą mogli korzystać przez stronę internetową za pomocą komputera lub telefonu. Panel sterujący będzie zawierał takie możliwości jak:

- indywidualne logowanie dla każdego domownika, co umożliwi stworzenie osobnego panelu dla każdego. Uniemożliwi to sterowanie ustawieniami pomieszczenia osobom, które nie są lokatorami tego pokoju. Ponadto uchroni to przed włamaniem się osób trzecich, ponieważ wymagane jest podanie hasła, które właściciel sam ustawi,
- możliwość sterowania mocą oświetlenia, poziomem rolet oraz temperaturą w ogólnodostępnych pomieszczeniach takich jak salon, kuchnia czy klatka schodowa,
- ustawianie harmonogramu – umożliwia to ustalenie godzin otwierania oraz zamykania rolet,
- panel sterowania ogrodem, w tym bramy, oświetlenie wody basenowej oraz światła na werandzie oraz w garażu,
- panel z prognozą pogody, w którym użytkownik może sprawdzić obecną pogodę w każdym mieście na świecie oraz prognozę na najbliższe dni,
- ustawienie daty i godziny oraz jej podgląd,
- możliwość sterowania alarmami oraz alerty w przypadku włamania lub pożaru.

Stany te są prezentowane na graficznym panelu sterowania całym systemem. Umożliwia on również sterowanie alarmem domu.

4. Program PLC

Główny program sterujący systemem inteligentnego domu dla sterownika PLC został opracowany z wykorzystaniem oprogramowania Home I/O oraz Codesys. Home I/O to narzędzie, które umożliwia łatwe tworzenie i zarządzanie inteligentnymi systemami domowymi przez symulowanie wszystkich głównych funkcji inteligentnego domu. Z kolei Codesys jest platformą programistyczną, która pozwala na tworzenie aplikacji dla urządzeń automatyki przemysłowej, takich jak sterowniki PLC. W projekcie został wykorzystany symulator nadrzędnego sterownika systemu (PLC) z biblioteki programu Codesys, co pozwoliło na testowanie i optymalizację oprogramowania przed bez potrzeby korzystania z fizycznego sterownika.

Dzięki zastosowaniu sterownika PLC użytkownik może łatwo i szybko kontrolować poszczególne elementy domu za pomocą pilota. W algorytmie programu sterującego systemem

wykorzystano bloki funkcyjne. Podstawowym programem, z poziomu którego wywoływane są wszystkie podstawowe funkcje systemu, jest blok Main. Zawiera on główne funkcje podstawowych zadań takich jak oświetlenie, praca rolet, sterowanie temperaturą itd.

Opracowano moduły programowe przeznaczone do sterowania:

- a) oświetleniem, który umożliwia włączanie i wyłączanie oraz regulację natężenia oświetlenia w różnych pomieszczeniach i na zewnątrz domu;
- b) roletami, steruje podnoszeniem i opuszczaniem rolet;
- c) temperaturą, które realizowane jest za pomocą termostatów naściennych i regulatora PID, odpowiedzialnego za utrzymanie temperatury w wybranym pomieszczeniu na zadanym poziomie przez dostosowywanie mocy grzejników;
- d) alarmem pożarowym, który aktywuje się automatycznie po wykryciu dymu przez umieszczone w pomieszczeniach czujniki dymu. Można go wyłączyć z poziomu panelu wizualizacji (panel SCADA) lub przez naciśnięcie łącznika zwiernego w przedpokoju;
- e) alarmem antywłamaniowym, aktywującym się z poziomu centrali systemu alarmowego znajdującej się w wybranym pomieszczeniu (przedpokój, przedsionek) lub z poziomu panelu wizualizacji.

5. Oprogramowanie użyte w projekcie

Jak już wspomniano, do opracowania systemu wykorzystano oprogramowanie:

- a) CodeSys do programowania sterowników PLC. Jedną z głównych zalet oprogramowania Codesys jest zintegrowany symulator PLC, który umożliwia testowanie programów w rzeczywistych warunkach. Codesys oferuje również różnorodne narzędzia interfejsu użytkownika (HMI);
- b) symulator inteligentnego domu – Home IO – oraz interfejs komunikacji Connect IO. Home IO jest symulatorem inteligentnego domu, czyli specjalną aplikacją, która pozwala na testowanie i symulowanie działania inteligentnych systemów domowych. Wirtualny symulator inteligentnego domu zawiera elementy sterujące takie jak [17]:
 - przyciski: monostabilne i bistabilne, rozjaśniające oraz ściemniające, jedno- i dwupozycyjne;
 - czujniki: ruchu, dymu, jasności, krańcowe do drzwi, okien i bram, obecności, otwarcia rolet;
 - termostaty do sterowania temperaturą w pomieszczeniu.

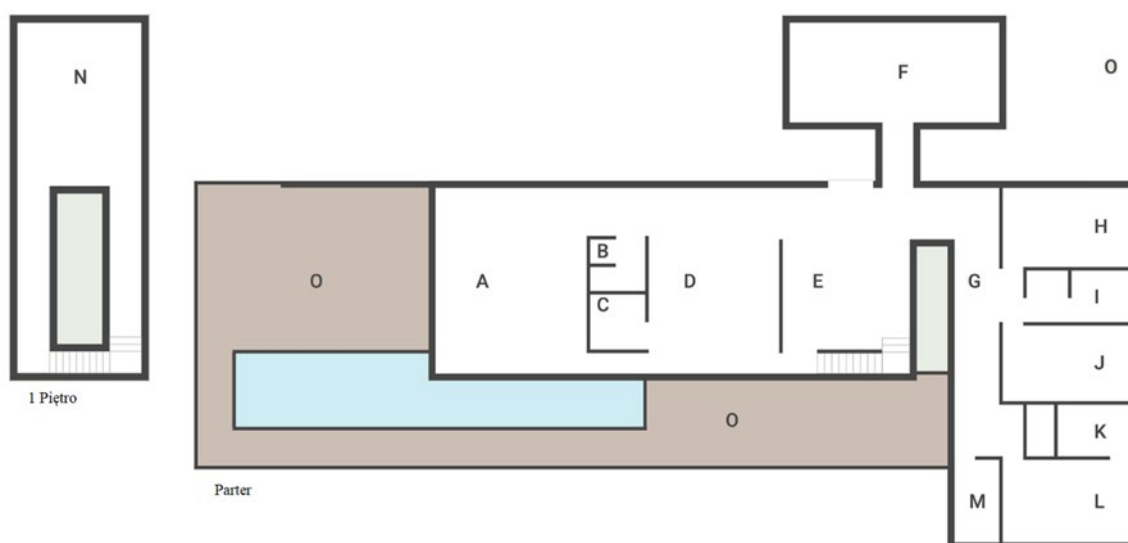
Poza tym aplikacja Home IO daje możliwość sterowania takimi podsystemami inteligentnego domu jak:

- oświetlenie (w pomieszczeniach, ogrodzie i basenu),
- napęd rolet i bram (garażowych i wjazdowej),
- ogrzewanie (cyfrowo lub analogowo),
- alarm wraz z syrenami na zewnątrz domu oraz w domu.

Ponadto Home IO daje możliwość wykorzystania do sterowania funkcjami inteligentnego domu pilota z 8 przyciskami, które mogą być dowolnie przez nas zaprogramowane.

Aplikacja do swoich działań symulacyjnych wykorzystuje wirtualny model struktury architektonicznej domu, dla którego projektowany jest system sterowania inteligentnym domem. Jej przykład pokazano na rys. 1.

Dodatek Connect I/O do sterowników PLC jest narzędziem umożliwiającym połączenie sterownika z innymi urządzeniami i systemami w inteligentnym domu. Dzięki temu użytkownik może sterować różnymi urządzeniami za pomocą jednego sterownika, co ułatwia zarządzanie inteligentnym domem [18].



Rys. 1. Rzut pomieszczeń w inteligentnym domu [17]: A – salon, B – toaleta gości, C – spiżarnia, D – kuchnia, E – przedpokój, F – garaż, G – korytarz, H – pokój dziecięcy, I – łazienka, J – pokój jednoosobowy, K – prywatna łazienka, L – sypialnia dla dorosłych, M – składzik, N – biuro, O – ogród

Fig. 1. Plan of rooms in a smart home [17]: A – living room, B – guest toilet, C – pantry, D – kitchen, E hall, F garage, G corridor, H children's room, I bathroom, J single room, K private bathroom, L bedroom for adults, M storeroom, N office, O garden

Sygnaly cyfrowe oraz analogowe aktywowane w aplikacji Home IO są przesyłane do dodatku Connect IO, gdzie następnie możliwe jest podłączenie takowego sygnału do sterownika przez wybrany przez nas protokół komunikacyjny.

6. Wizualizacja

Opracowana na potrzeby systemu wizualizacja pozwala na łatwe i intuicyjne zarządzanie całym systemem. Wizualizacja składa się z panelu logowania użytkownika, paneli do obsługi pomieszczeń ogólnodostępnych, w tym garaż i ogród, a także z panelu pogodowego. Dzięki temu użytkownik ma pełną kontrolę nad funkcjami domu i może w prosty sposób regulować

temperaturę, oświetlenie czy też sprawdzać poziom zabezpieczeń; użytkowanie systemu staje się bardziej przyjazne, a jego obsługa prostsza i bardziej intuicyjna.

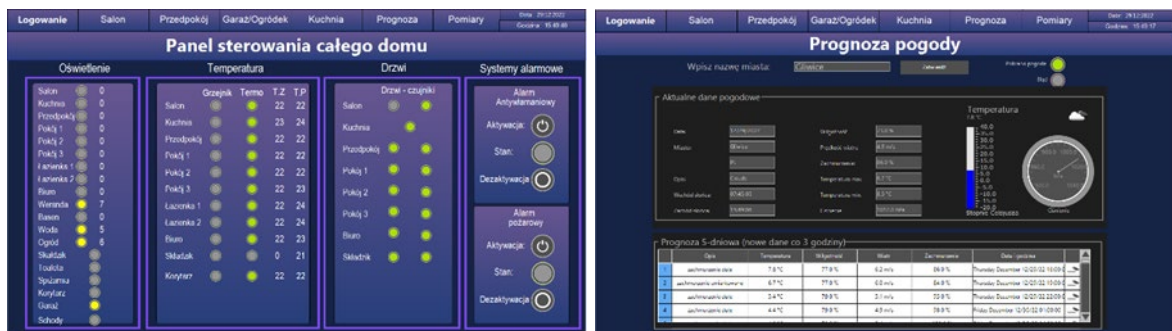
Dla salonu, kuchni i przedpokoju opracowano panel sterowania, który umożliwia kontrolę oświetlenia, rolet i odczyt danych z termostatu (rys. 2). Dla ogrodu i garażu panel sterowania (rys. 3) ma podobną strukturę, ale zamiast sterowania roletami i temperaturą można sterować bramą oraz oświetleniem wody w basenie, a także ozdobnym oświetleniem ogrodu.



a)

b)

Rys. 2. a) Panel sterowania w salonie, b) panel sterowania garażem oraz ogrodem
Fig. 2. a) Control panel in the living room, b) garage and garden control panel



a)

b)

Rys. 3. a) Panel sterowania całego domu, b) panel prognozy pogody
Fig. 3. a) Whole house control panel, b) weather forecast control panel

Pozostałe panele to ogólny podgląd domu, w którym znajdziemy stany oświetlenia, temperatury, czujników drzwi czy sterowanie alarmem oraz panel z prognozą pogody (rys. 3).

7. Wnioski

Inteligentny dom to coraz bardziej popularne rozwiązanie, które pozwala na zautomatyzowanie wielu procesów związanych z obsługą i kontrolą urządzeń domowych, a także zwiększenie bezpieczeństwa i komfortu mieszkańców. Istnieje wiele systemów i urządzeń przeznaczonych do programowania inteligentnych domów, ale sterownik PLC

wykorzystany w otwartym systemie sterowania inteligentnym domem wydaje się jednym z ciekawszych i bardziej elastycznych rozwiązań.

Sterownik PLC jest skutecznym narzędziem do programowania inteligentnego domu, ponieważ pozwala na zautomatyzowanie wielu procesów związanych z obsługą i kontrolą urządzeń domowych oraz dopasowanie opracowanych rozwiązań do indywidualnych potrzeb (funkcjonalność) i możliwości (koszt) osób korzystających z systemu inteligentnego domu.

System wizualizacji opracowywany do sterowania i obserwacji całego domu okazuje się bardzo przydatnym rozwiązaniem, ponieważ pozwala na łatwą i wygodną kontrolę nad całym systemem z poziomu jednego miejsca oraz powoduje, że obsługa całego systemu jest bardziej intuicyjna i przyjazna.

Pomimo że sterownik PLC ma ograniczenia w zakresie obsługi niektórych urządzeń, takich jak np. sprzęt audio czy kamery, to w porównaniu z innymi systemami i urządzeniami do programowania inteligentnych domów wydaje się bardzo skutecznym i elastycznym narzędziem, które pozwala na znaczne ułatwienie codziennego życia i zwiększenie bezpieczeństwa mieszkańców.

Bibliografia

1. Hanus G.: System zarządzania automatyką domową za pomocą sterownika PLC. Projekt inżynierski. Raport. Gliwice 2023, niepublikowane.
2. Clements Croome D.J.: Intelligent Buildings: Design, Management and Operation. ICE Publishing, 2nd ed., 2013.
3. Niezabitowska E., Sowa J., Staniszewski Zb. i in.: Budynek inteligentny, t. 1. Potrzeby użytkownika a standard budynku inteligentnego. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.

SYSTEM ZARZĄDZANIA AUTOMATYKĄ DOMOWA ZA POMOCĄ STEROWNIKA PLC

Streszczenie

W pracy opisano proces tworzenia programu do obsługi inteligentnego domu z wykorzystaniem sterownika PLC oraz wizualizacji umożliwiającej kontrolowanie różnych funkcji domu za pomocą smartfona lub tabletu. Program został zaprojektowany tak, aby automatyzować procesy związane z oświetleniem, temperaturą, bezpieczeństwem i innymi funkcjami, takimi jak np. regulacja rolet. Wizualizacja, dostępna przez smartfon lub tablet, pozwala na łatwe i intuicyjne zarządzanie całym systemem. Dzięki temu użytkownik ma pełną kontrolę nad funkcjami domu i może w prosty sposób regulować temperaturę, oświetlenie czy też sprawdzać poziom zabezpieczeń. W pracy przedstawiono również rozwiązania techniczne zastosowane w projekcie oraz przeprowadzono testy, których celem było potwierdzenie skuteczności działania systemu. Praca ta jest przykładem jak wykorzystanie nowoczesnych technologii może usprawnić funkcjonowanie domu i ułatwić codzienne życie.

Słowa kluczowe: inteligentny dom, automatyzacja, PLC, wizualizacja, oświetlenie, temperatura, bezpieczeństwo, funkcje domu, rozwiązania techniczne, testy skuteczności

HOME AUTOMATION MANAGEMENT SYSTEM WITH PLC

Abstract

In this work, the process of creating a program for controlling an intelligent home using a PLC controller and a visualization that allows the control of various functions of the home using a smartphone or tablet is described. The program was designed to automate processes related to lighting, temperature, security, and other functions such as regulating curtains. The visualization, available through a smartphone or tablet, allows for easy and intuitive management of the entire system. This way, the user has full control over the functions of the home and can easily regulate temperature, lighting, or check the level of security. The work also presents technical solutions used in the project and tests were carried out to confirm the effectiveness of the system. This work is an example of how the use of modern technologies can improve the functioning of the home and make everyday life easier.

Keywords: intelligent home, automation, PLC, visualization, lighting, temperature, security, home functions, technical solutions, effectiveness tests

Kamila HYRA¹, Paweł M. NUCKOWSKI², Waldemar KWAŚNY³, Tomasz SUPONIK⁴,
Dawid FRANKE⁵

PRZEGLĄD PIŚMIENNICTWA Z ZAKRESU GOSPODAROWANIA ELEKTROODPADAMI ORAZ METOD ODZYSKU METALI Z PŁYT OBWODU DRUKOWANEGO (PCB)

1. Wstęp

Wraz z postępowaniem cywilizacyjnym zwiększa się zużycie surowców pierwotnych, a szybko rosnące gospodarki mają coraz większe zapotrzebowanie na niektóre surowce krytyczne, których złoża w bliskiej przyszłości mogą ulec wyczerpaniu. Dzieje się tak ze względu na model gospodarczy, który funkcjonował we wcześniejszych dekadach. Polegał na wydobyciu materiałów, produkcji dóbr, a po zużytkowaniu pozbyciu się ich, bez uwzględnienia dalszego przetwarzania i pozyskania surowców wtórnych. Takie postępowanie spowodowało, że nawet te wartościowe surowce stawały się odpadami [1]. Główną przyczyną tego stanu rzeczy były czynniki ekonomiczne i brak opracowanych technologii, systemów gospodarowania odpadami [2] oraz brak dokumentów prawnych wymuszających lub zachęcających posiadaczy tych dóbr do optymalnego postępowania z nimi. W dobie rosnących cen nośników energii oraz wyczerpujących się złóż rozpoczęła się transformacja linearnego modelu gospodarczego do cyrkularnego, którego celem jest wydłużenie cyklu życia surowców przy zachowaniu ich odpowiedniej wartości [1, 3]. Ten model został nazwany gospodarką o obiegu zamkniętym

¹ Kamila.Hyra@polsl.pl, Szkoła Doktorów, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, <https://omega.polsl.pl/info/author/PSLad80ad0589aa4757b1ac86ae08d7a5ae/>

² Pawel.Nuckowski@polsl.pl, Laboratorium Badania Materiałów, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, <https://omega.polsl.pl/info/author/PSLf8e15db017ff444d914de181ac9c6966/>

³ Waldemar.Kwasny@polsl.pl, Katedra Spawalnictwa, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, <https://omega.polsl.pl/info/author/PSL59a0a0964962400bba29f6a8be71fc04/>

⁴ Tomasz.Suponik@polsl.pl, Katedra Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców, Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej, Politechnika Śląska, <https://omega.polsl.pl/info/author/PSL9a3ea815081b4e93891b3e1eca4d439c/>

⁵ Dawid.Franke@polsl.pl, Szkoła Doktorów, Katedra Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców, Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej, Politechnika Śląska, <https://omega.polsl.pl/info/author/PSLa30e8397ec604b9cb47fcf661adf6c18/>

(ang. *circular economy*). Jego implementacja jest konieczna w celu zachowania bezpieczeństwa surowcowego oraz zapewnienia zrównoważonego rozwoju [4].

Podczas pandemii COVID-19 gwałtownie wzrósł popyt na urządzenia elektryczne z powodu nagłej zmiany trybu pracy na zdalną oraz potrzebę kształcenia na odległość z wykorzystaniem technik komputerowych [1]. Z powodu konieczności pozostania w domu zmieniła się również forma rekreacji – zajęcia na dworze zastąpiła aktywność oparta na formie cyfrowej, wymagającej zakupu bądź modernizacji komputerów, telewizorów, konsoli do gier czy innych urządzeń elektronicznych [5]. Świadczą o tym m.in. wzrosty sprzedaży komputerów o ponad 11,2% w roku 2020 [6] oraz konsol do gier o 155% [7]. Na tej podstawie można przypuszczać, że w następnych latach nastąpi gwałtowny wzrost produkcji elektroodpadów.

Elektroodpady to jedne z najszybciej rosnących strumieni odpadów. Jak podaje United Nation Institute for Training and Research, w roku 2019 ludzkość wygenerowała 53,6 mln ton zużytego sprzętu elektronicznego i elektrycznego (ang. *Waste Electrical and Electronic Equipment*, WEEE), którego wartość wynosiła 57 mld USD. Szacuje się, że strumień tych odpadów w 2030 r. wzrośnie do 74,7 Mt, a w 2050 r. do aż 110 Mt [8]. Niewłaściwe magazynowanie lub przetwarzanie WEEE może być przyczyną problemów środowiskowych i degradacji środowiska naturalnego [9]. Podstawowym i kluczowym elementem niemal wszystkich produktów elektronicznych są płyty obwodów drukowanych (ang. *Printed Circuit Boards*, PCB), które można określić jako podstawę elektroniki. Ich recykling jest najbardziej wymagający, przede wszystkim ze względu na złożoność budowy. Największą wartość zużytej PCB stanowią złoto, pallad, srebro i miedź, a odzysk tych metali może przynieść znaczącą korzyść ekonomiczną oraz środowiskową, stanowiąc istotny element gospodarki opartej na zrównoważonym rozwoju (oszczędność złóż naturalnych oraz zmniejszenie ilości zalegających odpadów) [10].

Celem pracy było przedstawienie stanu recyklingu zużytych płyt obwodów drukowanych – od pozyskania elementów, poprzez ich demontaż po dalsze metody obróbki, mające na celu uwolnienie możliwie jak największej ilości surowców do dalszego przetworzenia i ponownego użycia. Przedstawione procesy, oparte na idei gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonego rozwoju, niosą ze sobą wiele korzyści środowiskowych, ekonomicznych czy energetycznych.

2. Ogólna charakterystyka PCB

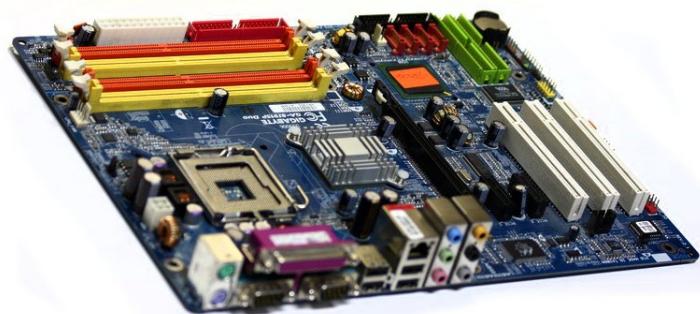
Płyta obwodu drukowanego, inaczej zwana płytką drukowaną, to płyta wykonana z materiału dielektrycznego, która została pokryta ścieżkami oraz punktami lutowniczymi bądź

kontaktowymi z miedzi – materiału przewodzącego. Płytki drukowane stanowią podstawę mechaniczną dla układów elektronicznych oraz są miejscem usytuowania sieci połączeń pomiędzy elementami układu trwale zamontowanymi na PCB. Do wykorzystywanych komponentów, zapewniających optymalną i wydajną pracę sprzętu elektronicznego, należą takie urządzenia jak: tranzystory, rezystory, stabilizatory napięcia, bezpieczniki i transformatory czy półprzewodnikowe układy scalone bądź kondensatory. Płytką drukowaną stanowi podstawę działania każdego sprzętu elektronicznego, a układy na niej montowane stają się z biegiem czasu coraz bardziej złożone. Sama konstrukcja płyt ulega zmianie, próbując sprostać coraz większym wymagom stawianym przez producentów sprzętu elektronicznego. Płyty obwodów drukowanych wykorzystuje się także przy wytwarzaniu produktów dla przemysłu zbrojeniowego czy kosmicznego. Za najprężniej rozwijające się obszary w dziedzinie projektowania i wytwarzania płytek drukowanych uważa się USA, Wielką Brytanię, Niemcy i Francję; spekuluje się, że ich przewaga będzie wciąż rosnąca, pokonując kraje azjatyckie, które obecnie biorą udział w 75% produkcji PCB (ze szczególnym uwzględnieniem Chin). Proces wytwarzania płytek jest złożony i skomplikowany, niejednokrotnie wymaga zastosowania kilkudziesięciu etapów z wykorzystaniem drogich urządzeń, w związku z tym produkcja PCB jest niezwykle kapitałochłonna, uwzględniając także materiały składowe płytek, które również wymagają sporych nakładów finansowych [11-13].

3. Budowa płyt obwodów drukowanych (PCB)

Płytką drukowaną jest laminatem, czyli warstwowym materiałem kompozytowym, którego poszczególne fazy nie są w sobie rozpuszczone, zachowując swoje suwerenne własności, jednak nadając całemu nowo powstałemu elementowi wiele nowych cech, których każda faza z osobna nie ma. Wyróżnia się płytki jednostronne, dwustronne oraz wielowarstwowe. Ze względu na własności fizyczne dokonuje się następującej klasyfikacji: płytki sztywne, elastyczne i mieszane. Dwie podstawowe warstwy laminatu to warstwa miedzi oraz warstwa dielektryka. Dielektryk to substancja słabo przewodząca prąd elektryczny, izoluje kolejne znajdujące się w PCB warstwy miedzi. Liczba warstw miedzi jest najczęściej parzysta, wyjątek stanowi płytka jednostronna (jedna warstwa miedzi). Na nich znajdują się pady, ścieżki i przelotki – punkty lutownicze bądź kontaktowe, połączenia między punktami lutowniczymi, miejsca, w których bieg ścieżki zostaje przeniesiony na dalszą warstwę. Wyróżnić też można otwory niemetalizowane – montażowe – oraz metalizowane, a także poligony – duże miedziane obszary do odprowadzenia ciepła czy ekranowania. Stosuje się różnego rodzaju warstwy maski, dające izolację elektryczną, aby zapobiec procesom korozyjnym miedzi, odsłonięte są jedynie

pady. Maski występują dwukrotnie, po każdej stronie PCB, wyjątek ponownie stanowi płytka jednostronna. Warstwa ta nadaje płycie wybrany kolor, najczęściej jest to charakterystyczna, zielona barwa. Wytwarza się ją częstokroć z cyny. Wyróżnić również można warstwę opisu, nakładaną na maskę, zawierającą elementy graficzne, jej kolor kontrastuje z barwą maski. Są to obrysy komponentów, napisy informujące o nazwie płytki bądź określające nazwy znajdujących się na niej elementów. Rysunek 1 przedstawia przykładową PCB [14-15].



Rys. 1. Przykładowa płyta obwodu drukowanego – płyta główna komputera

Fig. 1. An example of a printed circuit board – a computer's motherboard

Źródło: opis płyty głównej komputera: <https://olimp.wroclaw.pl/slownik/plyta-glowna>

Płyta główna komputerów to najczęstszy podawany przykład, kiedy mowa o płytach obwodów drukowanych. Na wielowarstwowej płycie (z kompozytu zawierającego naprzemiennie warstwy miedzi oraz dielektryka w postaci, przykładowo, tkaniny szklanej zatopionej w żywicy epoksydowej) umieszczone są takie urządzenia jak procesor, karty graficzne, karty pamięci (RAM czy ROM), kondensatory, cewki czy tranzystory. Zapewniają optymalną pracę komputera. Podobne elementy można zidentyfikować po usunięciu obudowy z różnego sprzętu RTV, jednakże będą one charakteryzowały się innymi parametrami ze względu na odmienne przeznaczenie urządzeń oraz różnice występujące w mocy każdego aparatu [16].

Na rynku dostępny jest coraz szerszy wachlarz PCB, w zależności od potrzeb i zastosowania. Pojawia się coraz więcej wyspecjalizowanych firm, wytwarzających określone typy płytek drukowanych. PCB dla urządzeń o wysokiej częstotliwości to najczęściej wielowarstwowe (hybrydowe) rozwiązania, w których warstwa dielektryka stanowi specjalne ceramiczne wypełnienie, poprawiające przewodność cieplną układu (wyższym częstotliwościom pracy towarzyszy emisja energii cieplnej, co może negatywnie wpływać na niektóre typy połączeń lutowanych). Dla układów o wysokiej mocy wykorzystuje się laminaty z rdzeniem aluminiowym, skutecznie odprowadzającym ciepło. Specyficzną budową charakteryzują się także płytki elastyczne, wykorzystywane w urządzeniach telekomunikacyjnych, elektronice użytkowej, zabawkach czy nawet w sprzęcie wojskowym. Ich wielką zaletą są mniejsze wymiary gabarytowe, w szczególności grubość, a przede wszystkim łatwość w dostosowaniu kształtu PCB do obudowy urządzenia [17-19].

4. Materiały wykorzystywane przy produkcji płyt obwodów drukowanych (PCB)

Zakres materiałów wykorzystywanych do produkcji PCB determinuje National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Klasyfikacja ta jest oparta na takich parametrach materiału jak: niepalność, pochłanianie wilgoci oraz stabilność w wysokiej temperaturze, bez gwarancji parametrów elektrycznych materiału (organizacja skupia się przede wszystkim na bezpieczeństwie urządzeń elektrycznych). Laminaty oznacza się według klas FR (łatwopalności – ang. *flame resistance*), G (o specjalnych własnościach) oraz według innych schematów. Cyfry przy oznaczeniach FR są podawane w celu gradacji ognioodporności: FR-1 – najmniejsza, FR-5 – największa [20].

W tabeli 2 zestawiono nazwy laminatów, komponenty składowe oraz krótką specyfikację każdego z materiałów. Dodatkowo zamieszczono inne wykorzystywane materiały, które zyskują coraz większą popularność wśród projektantów. Zauważyć można, że w wymienionych komponentach dominują włókna szklane oraz żywica epoksydowa, zakres ich zastosowania zależy od temperatury zeszklenia czy nadanej klasy palności (palność ograniczającą dodawane do żywic związki m.in. bromu czy innych pierwiastków, które mogą być toksyczne przy spalaniu w określonej, wysokiej, temperaturze), ma to głównie związek z wykorzystywanymi materiałami lutowniczymi i ich temperaturą topnienia [14-15].

Poddając zużyte sprzęty elektroniczne procesom recyklingu, należy wziąć pod uwagę, że na płycie PCB naniesione już zostały połączenia lutownicze oraz inne elementy, które także składają się z określonych materiałów. Płytki drukowane zawierają trzy główne typy materiałów: związki organiczne, ceramikę i metale. Z punktu widzenia odzysku materiałów najbardziej opłacalne wydaje się ponowne wykorzystanie metali, ponieważ ich pozyskanie w postaci surowej wiąże się z największymi kosztami. W tabeli 1 przedstawiono metale, które możliwe są do zidentyfikowania w zużytych sprzętach elektronicznych. Każdą płytę, zamontowaną zarówno w telewizorach, jak i komputerach, telefonach komórkowych, kalkulatorach czy odtwarzaczach DVD, można scharakteryzować, używając tej samej kompozycji pierwiastków (Fe, Cu, Al, Pb, Ni, Ag, Au, Pd), jednak ich udział procentowy jest różny w zależności od urządzenia [13, 22-23].

Pierwiastki występujące w PCB

Element	Możliwe pierwiastki
PCB (bez naniesionych urządzeń i połączeń)	Al, Cu
Elementy przewodzące	Ni, Ag, Au, Sn, stopy Sn – Pb
Elementy półprzewodnikowe	Ga, Si, Se, Ge, Ga – As, Ga – P, In – P, Ga – As – P, Hg – Cd – Te
Połączenia lutowane i kleje	An, Pb, Cd, Sn – Pb, Ag – Pb – Sn, Sn – Sb, Be – Sn, In – Sn
Złote przewody	Au z domieszką Cu i Si
Kondensatory	Ta, Zn, złącza lutownicze Pb – Sn, Fe, Cu, Al, Ta ₂ O ₅ , tlenki Mn, Au – Ni, Pd, Ag, Sn, Ca, Mn, Pb, B, Na, Al, K
Rezystory	Au – Ni, Cu – Ag, Ni – Fe, Ni – Cr
Układy scalone	Ga, In, Ti, Si, Ge, As, Sb, Se, Te
Diody	Ge, Si
Cewka indukcyjna	Cu, Pr, Co, Nd
Przełączniki	Fe, Cu z żywicą epoksydową, Be, Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cr, Si, Mo, Ti, Al, C, V, Ba, Sm, Se, Pr, Nd, Cd, Au, Ag
Łączniki i wejścia	InP, GaP, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Be – Cu

Źródło: materiały firmy Solitech, <https://solitech.pl/obwody-drukowane.html> [dostęp: 23.02.2023 r.]; Menad N., Van Houwelingen J.: *Identification and recovery of rare metals in electric and electronic scrap: a review*, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium, 2011

Tabela 2

Materiały wchodzące w skład PCB (przykłady)

Oznaczenie	Materiały składowe	Specyfikacja
FR-1 i FR-2	Papier i żywica fenolowa	Ten typ kompozytu wykorzystuje się przy produkcji płytek jednostronnych, stosowanych w urządzeniach powszechnego użytku. FR1 i FR2 charakteryzują się podobnymi parametrami, dlatego też producenci wytwarzają tylko jeden z materiałów. Wykazują łatwość obróbki mechanicznej (frezowanie, wycinanie), są mało odporne na działanie wilgotnej atmosfery.
FR-4	Tkanina szklana i żywica epoksydowa	Materiał najczęściej wykorzystywany do produkcji PCB – jednostronnych, dwustronnych oraz wielowarstwowych obwodów drukowanych, o podwyższonych wymaganiach w zakresie wytrzymałości mechanicznej – wykazuje doskonałe parametry zarówno mechaniczne, jak i elektryczne. Produkuje się z nich także PCB do zastosowań przemysłowych.
G-10	Tkanina szklana i żywica epoksydowa	Laminat ten ma najlepszą odporność na rozwarstwienie, charakteryzuje się dużą rezystancją izolacji, jest odporny na wilgoć.
PD	Poliimid (elastyczna folia polimerowa) na podstawie z włókien aramidowych	Poliimid stosuje się do produkcji sztywno-elastycznych i elastycznych PCB, przy warunkach pracy w stałych, wysokich temperaturach, przy nagłych spadkach temperatur. Płytki takie charakteryzują się odpornością chemiczną, wytrzymałością na rozrywanie, ich współczynnik rozszerzalności temperaturowej często pokrywa się z miedzią, dlatego wykorzystuje się je w sprzętach wojskowych.
Do wysokiej częstotliwości	Laminat epoksydowy z wypełniaczem ceramicznym (teflon)	Wypełniacz ceramiczny poprawia przewodność cieplną kompozytu. Nadają się do lutowania bezołowiowego. Wykorzystywany często teflon nie nasiąka wodą oraz jest giętki, bardziej niż laminaty epoksydowe.

Zródło: materiały firmy Solitech, <https://solitech.pl/obwody-drukowane.html> [dostęp: 23.02.2023 r.]; Materiały firmy Nanotech Elektronik Sp. z o.o.: <http://www.nanotech-elektronik.pl/index.php/pl/info/materiały> [dostęp: 24.01.2020 r.]; Kręcejewski M., *Poradnik elektronika: co powinniśmy wiedzieć o płytkach drukowanych?*, <https://mikrokontroler.pl/2011/07/19/poradnik-elektronika-co-powinnismy-wiedziec-o-plytkach-drukowanych/2/> [dostęp: 25.02.2023 r.]; Materiały firmy Solitech, <https://solitech.pl/pcb.html> [dostęp 23.02.2023 r.]

5. Elektrośmieci – skala problemu

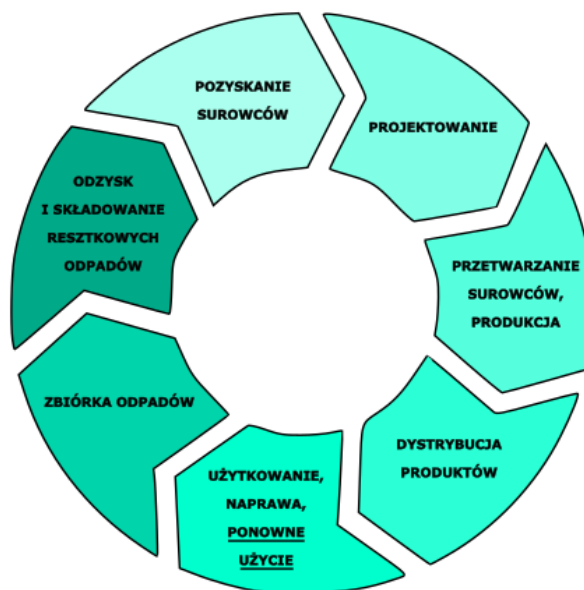
Dyrektywa w sprawie zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych WEEE wydana została przez Unię Europejską w 2002 r., później zredagowana na nowo w 2012 r., obejmuje wiele zagadnień związanych z czynnościami odnoszącymi się do elektroodpadów – zepsutego lub nieużywanego już sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Według tejże dyrektywy WEEE definiowany jest jako *zużyte urządzenie, którego prawidłowe działanie jest uzależnione od dopływu prądu elektrycznego lub od obecności pól elektromagnetycznych, oraz urządzenie mogące służyć do wytwarzania, przesyłu lub pomiaru prądu elektrycznego lub pól elektromagnetycznych, które są zaprojektowane do użytku przy napięciu elektrycznym nieprzekraczającym 1000 V dla prądu przemiennego i 1500 V dla prądu stałego*. Celem wydania dokumentu jest ochrona zdrowia ludzkiego oraz środowiska naturalnego przez promowanie zrównoważonej produkcji i konsumpcji, co ma być osiąganym przez określone działania. Najważniejszym aspektem jest zmniejszenie ilości produkowanych elektroodpadów. Istotną jest także promocja ponownego wykorzystania, recyklingu oraz odmiennych metod odzysku materiałów z odpadów WEEE, co związane jest z wydajniejszym wykorzystywaniem dostępnych zasobów, a także odzyskiem cennych i rzadkich materiałów. Dyrektywa nakłada również zobowiązania na podmioty zaangażowane w cykl życia urządzeń elektronicznych – producentów, dystrybutorów, konsumentów, a także instytucje zajmujące się przetwarzaniem WEEE. Do 2025 r. co najmniej 55 procent odpadów ma być objętych recyklingiem, do 2030 r. – 60 procent, a do 2035 – 65 procent [24]. Pakiet odpadowy, obowiązujący w Unii Europejskiej od lipca 2018 r., obejmuje kwestie związane z przechowywaniem, składowaniem, spalaniem, utylizacją i recyklingiem elektroodpadów, a także związane z wdrożeniem zachęt do stosowania porządku, hierarchii postępowania z elektroodpadami. Odpowiedzią na to jest wprowadzenie polskiego pakietu odpadowego, obowiązującego od września 2018 r., zmieniającego ustawę o odpadach oraz innych, umożliwiających sprawowanie szerszej kontroli nad podmiotami, które zbierają, magazynują i przetwarzają odpady. Przepisy te wzmocniły działanie Inspekcji Ochrony Środowiska, dając możliwości i narzędzia do wykrywania i zwalczania nadużyć [25].

Na rynku sprzętu elektronicznego zauważano następującą tendencję – żywotność urządzeń maleje drastycznie, a ich naprawa, w przypadku usterki, staje się nieopłacalna, głównie ze względów ekonomicznych, ale także technologicznych. Nowsze urządzenia opierają się na coraz to nowszych i bardziej zaawansowanych rozwiązaniach, przez co stają się atrakcyjne dla kupującego. Działania te związane są z polityką producentów, nastawioną przede wszystkim na własny zysk. Powoduje to wciąż rosnące, i to w szybkim tempie, ilości trudnych do przetworzenia odpadów (budowa poszczególnych komponentów jest bardzo złożona). Dlatego też działania Unii Europejskiej skoncentrowane są na zmianie opisanych tendencji. Jednym z aktów wspomagających założenia ujęte w Dyrektywie 2012/19/UE jest komunikat *Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: Program „zero odpadów” dla Europy*, w którym opisana

jest idea gospodarki o obiegu zamkniętym. Idea ta odpowiada koncepcji zrównoważonego rozwoju zgodnie z założeniem, że rozwój ten zaspokaja aktualne potrzeby konsumentów (pokolenia), nie umniejszając szans przyszłych pokoleń na ich zaspokojenie. Wręcz przeciwnie – odpowiednie gospodarowanie zużytymi sprzętami elektronicznymi w znaczny sposób, przez oszczędzanie zasobów naturalnych, wydłuża ich żywotność i możliwość wykorzystania. Według koncepcji *circular economy* surowce, produkty oraz materiały powinny pozostawać w gospodarce najdłużej, jak to możliwe, a powstałe odpady traktowane są jako surowce wtórne, które poddaje się przetwórstwu oraz ponownemu wykorzystaniu. To podejście zostało zobrazowane na rysunku 2. Po pozyskaniu surowców oraz zaprojektowaniu urządzenia, wraz z technologią przetworzenia surowców wtórnych, przystępuje się do produkcji, następnie wytworzone sprzęty są dystrybuowane do pośredników i konsumentów. Użytkownicy w przypadku awarii mają mieć możliwość naprawy urządzenia, a gdy jest to niemożliwe, mają je złożyć w wyznaczonym punkcie zbiórki odpadów. Stamtąd urządzenia są wysyłane do instytucji zajmujących się odzyskiem surowców wtórnych, które następnie kieruje się do innych przedsiębiorstw w celu ich ponownego wykorzystania. Odpady resztkowe, niepodlegające recyklingowi, składowane są w specjalnie przystosowanych do tego miejscach [16, 17].

World Economic Forum podaje, że na świecie każdego roku produkuje się około 50 mln ton WEEE. W przypadku gdy nie wdroży się planów naprawczych, ilość odpadów drastycznie się zwiększy. Badania i analizy rynku oraz procesów wytwarzania pokazują, że przetwórstwo elektroodpadów i odzysk materiałów mogą przynieść zysk dla UE rzędu 630 miliardów dolarów netto, tj. około 3% PKB [25]. Aspekt ochrony środowiska jest również istotny – urządzenia produkowane do 2006 r. zawierają niebezpieczne substancje, takie jak kadm, freon czy rtęć, mogące stanowić zagrożenie dla organizmów żywych w przypadku ich nieprawidłowego składowania [26, 29, 30]. Aby zobrazować dane ilościowe, z odpadów jednostek centralnych oraz monitorów komputera stacjonarnego (27 kg) pozyskać można około 5,6 kg stali, 1,9 kg miedzi, 3,5 kg aluminium [25].

Każdy mieszkaniec Europy produkuje około 15,6 kg odpadów rocznie, natomiast 7 kg z tego jest zbieranych oraz przetwarzanych [25]. Polska na tle Unii Europejskiej pod względem ilości zebranych elektroodpadów znajduje się na siódmym miejscu. Liderami są państwa skandynawskie, gdzie zbiera się 80% masy wytworzonego sprzętu. W 2017 r. w Polsce udało się przekroczyć próg minimalnej ilości zbieranych WEEE, wynoszący 4 kg *per capita*, co kilka lat wcześniej wydawało się nie do osiągnięcia (rok 2007 – 0,71 kg na mieszkańca). Mimo tego Naczelna Izba Kontroli w roku 2017 opublikowała raport, według którego system zbiórki i przetwarzania zużytego sprzętu elektronicznego (ZSEE) wymaga poprawy. Zanotowano, że wiele przedsiębiorstw gromadzi i przetwarza WEEE bez odpowiedniego przygotowania, nie ma właściwego wyposażenia hali oraz urządzeń. Dlatego też problem utylizacji elektroodpadów i odzysk jak największej części materiałów wykorzystanych do wytworzenia sprzętu elektronicznego wydaje się bardzo istotny, jak również naglący [30-32].



Rys. 2. Idea gospodarki obiegu zamkniętego

Fig. 2. The idea of a circular economy

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Schemat obrazujący ideę gospodarki obiegu zamkniętego, który stanowi wzór dla tego umieszczonego w pracy <https://aplia.pl/nasze-stanowisko-do-mapy-drogowej-goz/>

Przez lata zauważa się praktykę wywożenia zalegających urządzeń do krajów rozwijających się, takich jak Indie czy Ghana, podając do wiadomości, że jest to sprzęt używany, ale działający, co pozwala na ominięcie obostrzeń prawnych dotyczących nielegalnego transportu elektroodpadów. W tych krajach elektrośmieci są sprzedawane, a kupujący podejmują się niejednokrotnie prób odzysku surowców z dostarczonych urządzeń, najczęściej metodami niesprawdzonymi, szkodliwymi – amatorskimi. Dlatego też ważne jest rozważenie alternatyw jak najbardziej neutralnego dla ludzi i środowiska przetwórstwa zużytych sprzętów. Ponadto otworzyłyby to nowe perspektywy przed państwami niedysponującymi własnymi zasobami surowców naturalnych, takimi jak Japonia. Z punktu widzenia tych obszarów recykling jest opłacalnym przedsięwzięciem, ponieważ, przykładowo, tona zużytych telefonów komórkowych zawiera 3,5 kg srebra, 300 – 350 g złota, 140 g palladu. Według dyrektywy Unii Europejskiej działania te mają być ograniczane przez nałożenie na państwa członkowskie wymagań odnośnie do ilości zbieranego zużytego sprzętu elektronicznego – od stycznia 2021 roku minimalny poziom ma wynosić 65% masy średniej wprowadzonego w czasie ostatnich trzech lat sprzętu. Działania te mają być dokumentowane w odpowiedni sposób. Ideą jest elektryczny monitoring WEEE, umożliwiający śledzenie drogi urządzenia od produkcji do odzysku [29, 30, 33].

6. Problemowość recyklingu PCB

Odzysk surowców z zużytych sprzętów elektronicznych, jak wspomniano w poprzednim podrozdziale, jest opłacalnym przedsięwzięciem nie tylko ze względów ekonomicznych, lecz także w trosce o ograniczone zasoby naturalne i środowisko. Działania oparte na recyklingu oszczędzają źródła pierwotne, zmniejszają ilość wygenerowanych odpadów, oszczędzają środowisko naturalne przez ograniczenie zanieczyszczeń wygenerowanych przez metale ciężkie i inne toksyczne związki czy gazy. Odzysk umożliwia pozyskanie zarówno materiałów metalowych (żelazne i nieżelazne, a także metale szlachetne), jak i tworzyw sztucznych czy ceramiki. Dodatkowo procesy te są mniej energochłonne niż wydobywanie metali z rudy. Zasoby naturalne są ograniczone, nie można dopuścić, aby w przyszłości ich zabrakło, dlatego należy podjąć kroki umożliwiające odzysk szczególnie takich metali jak złoto, srebro czy pallad [23, 29].

Współcześnie wykorzystywane technologie recyklingu można sklasyfikować na dwie główne grupy [14]:

- technologie ze zmianami chemicznymi: wykorzystujące procesy pirolizy, metalurgii oraz hydrometalurgii,
- technologie bez zmian chemicznych: oparte na działaniu mechanicznym – demontaż, rozdrabnianie, separacja oraz obróbka chemiczna.

Największe problemy z przetwórstwem generują złożoność budowy PCB oraz zróżnicowany skład materiałowy, związane przede wszystkim z następującymi zagadnieniami [4]:

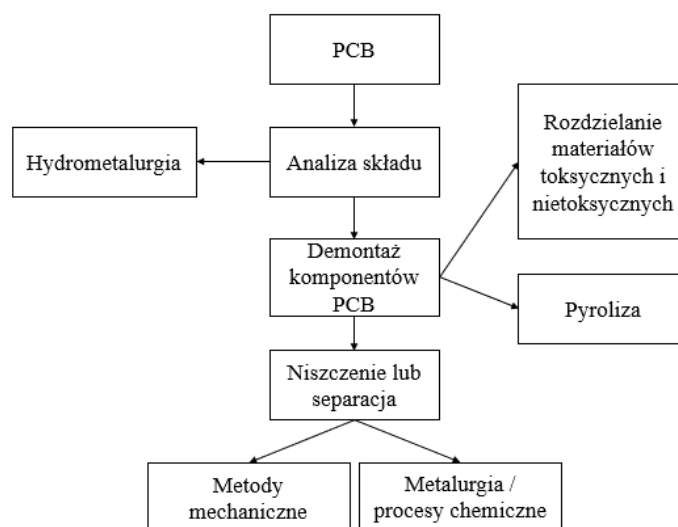
- Opracowane już metody recyklingu skupiają się w znacznej mierze na recyklingu metali, zapominając o pozostałej części, stanowiącej około 70% – odzyskuje się niewielką część całego elementu, a zagospodarowanie pozostałej części przysparza wielu kłopotów.
- Złożoność budowy oraz sama metoda nanoszenia ścieżek czy innych elementów utrudniają ustalenie dokładnego składu materiałowego, komplikują możliwość zautomatyzowania procesu demontażu oraz segregacji PCB.
- Efektywność procesów jest relatywnie niska ze względu na małą ilość i niewielką koncentrację metali ziem rzadkich.
- Ograniczenie ilości odpadów i oszczędzenie w ten sposób środowiska naturalnego to, co prawda, pozytywny aspekt, jednak same procesy recyklingu nie są neutralne dla fauny i flory, również wpływają na nie w sposób negatywny. Trudno jednoznacznie i precyzyjnie osądzić, które działania są bardziej inwazyjne.

7. Recykling płyt obwodów drukowanych (PCB)

Uogólniony, podstawowy proces recyklingu płyt obwodu drukowanego składa się z trzech etapów [14]:

- Obróbka wstępna: przed przystąpieniem do wymienionych działań zaleca się wykonanie analizy składu chemicznego w celu późniejszego odpowiedniego dobrania metod odzysku, jednak jest to etap opcjonalny i kosztowny. Następnie przeprowadza się demontaż z segregacją na części przeznaczone do recyklingu i elementy toksyczne. Niekiedy pomija się rozbiórkę PCB, podczas odzysku traktuje się ją w sposób całościowy.
- Separacja/koncentracja: na tym etapie korzysta się z urządzeń rozdrabniających, produktem procesu jest granulata o określonej wielkości ziarna, który następnie poddawany jest oczyszczaniu.
- Oczyszczanie/odzyskiwanie (mechaniczne lub chemiczne): proces ten trwa do momentu uzyskania oczekiwanej postaci wyjściowego produktu.

Na rysunku 3 przedstawiono skrótowo wyżej opisane czynności. W dalszej części pracy zostaną rozwinięte wymienione etapy.



Rys. 3. Ogólny zarys odzysku materiałów z PCB

Fig. 3. General overview of PCBs materials recycling

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Li J., Shrivastava P., Gao Z., Zhang H – Ch., Printed Circuit Board Recycling: A State-of-the-Art Survey, IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 27, no. 1, January, 2004

7.1. Obróbka wstępna

Pierwszą częścią, nieobligatoryjną, lecz zalecaną, jest analiza składu materiałowego. Celem tego działania jest dobór procesów umożliwiających najbardziej wydajny odzysk surowców oraz możliwie najbardziej niwelujących szkodliwy wpływ na środowisko naturalne. Aby

analiza była rzetelna, konieczna staje się znajomość potencjalnego składu chemicznego (jakościowego oraz ilościowego) badanego elementu; jest to utrudnione ze względu na niewystarczającą wiedzę z tego zakresu samych producentów PCB. Dlatego tak istotne jest studium literatury dotyczącej materiałoznawstwa elektrotechnicznego oraz budowy płytek drukowanych i zamieszczonych na niej komponentów. Przygotowanie próbek do badań odbywa się z wykorzystaniem odpowiednich maszyn; konieczne jest rozdrobnienie materiału, aby móc zidentyfikować jak najwięcej znajdujących się w próbce materiałów [14, 35, 36].

Przystępując do kolejnego procesu, demontażu, należy zidentyfikować rodzaje połączeń występujących w płytkach drukowanych. Są to: podstawki, połączenia lutowane dla montażu powierzchniowego, połączenia nitowe i śrubowe. Każde z wymienionych wymaga różnej ingerencji przy demontażu. Celem tej operacji jest segregacja poszczególnych części – podział elementów na te nadające się do ponownego wykorzystania oraz części toksyczne (niebezpieczne pod względem ekologicznym) – a także zdemontowanie urządzeń na mniejsze elementy składowe, w przypadku których możliwe jest dalsze przetwarzanie. Część przypadków opiera się na czynnościach ręcznych, podejmuje się jednak próby pełnego zautomatyzowania procesu. Wyróżnia się dwie najbardziej popularne metody demontażu, w obu wariantach istnieje konieczność posiadania informacji o rozłączanych elementach. Współcześnie do identyfikacji systemów wykorzystuje się oprogramowania służące do rozpoznawania obrazów, oparte na technologii 1D, 2D bądź 3D, rozpoznawaniu w podczerwieni, a także z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego. Przytoczone systemy współpracują ze specjalistycznym oprogramowaniem komputerowym, zawierającym odpowiednią bazę danych (informacje na temat geometrii, gęstości materiałów składowych, własności fizycznych czy magnetycznych) [4]. Metody demontażu są następujące [14]:

- Demontaż selektywny (ang. *look and pick*): polega na odszukaniu, zidentyfikowaniu oraz określeniu jego współrzędnych i zastosowanych połączeń, a następnie usunięciu każdego komponentu z osobna. Rozpoznanie elementów powinno być jak najszybsze, aby proces był wydajny. W tym przypadku najlepiej sprawdza się system trójwymiarowego obrazowania i rozpoznawania optycznego.
- Demontaż jednoczesny (ang. *evacuate and sort*): w tym przypadku podgrzewa się PCB do odpowiedniej temperatury, aby wylutować wszystkie znajdujące się na niej elementy i spowodować, aby komponenty samoczynnie oderwały się z powierzchni płytki. Segregacja pozostałych elementów przebiega na podstawie ich indywidualnych cech (na przykład geometrycznych i fizycznych), z wykorzystaniem oprogramowania identyfikacyjnego. Ten typ demontażu charakteryzuje się wyższą wydajnością, jednak jednocześnie zwiększa się ryzyko trwałego uszkodzenia odłączanych komponentów. Dodatkowo większe koszty generuje konieczność dodatkowego sortowania, co pochłania także czas. W przypadku demontażu jednoczesnego wykorzystuje się zazwyczaj jednowymiarowy system rozpoznawania.

Ostatnim krokiem obróbki wstępnej jest zgniatanie i spalanie pozostałości po demontażu. Celem operacji jest redukcja wagi oraz homogenizacja złomu. Przeprowadza się ją w piecach rozgrzanych do temperatury 400-800°C, do których wprowadza się papier, tekturę oraz tworzywa sztuczne: wynikiem tego procesu jest redukcja masy nawet o 30 proc. Podczas spalania usuwa się węgiel, ale tworzący się w tym czasie żużel, który zawiera związki metaliczne, wymaga przetworzenia (przykładowo kruszenia), aby ujednorodnić surowiec i wyeliminować większe kawałki ceramiczne, utrudniające późniejsze procesy wytopu. Należy pamiętać, że spalanie tworzyw sztucznych bez odpowiednich zabezpieczeń jest niebezpieczne ze względu na emisję szkodliwych związków w postaci gazów [14].

7.2. Separacja, koncentracja oraz odzysk i oczyszczanie

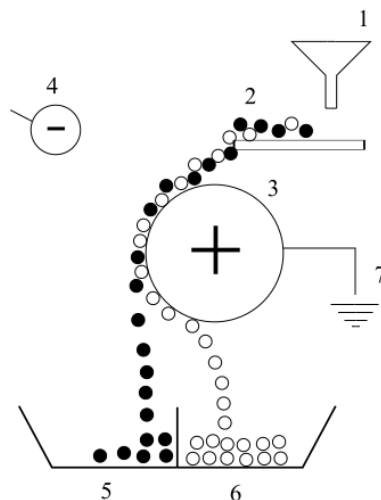
Skuteczność recyklingu określają dwa kryteria: efektywność odzysku oraz wpływ na środowisko. Aby ściślej sprecyzować wymogi, zdefiniowano dwa współczynniki [14]:

- RRE (ang. *resource recovery efficiency*) – efektywność wykorzystania zasobów, opisywana jako iloczyn procentu odzyskanych zasobów podczas procesu oraz zawartości danego zasobu w jednej tonie złomu, podzielony przez światowe zasoby danego materiału.
- RPP (ang. *resource recovery potential*) – potencjał zasobów wykorzystanych, definiowany przez iloraz zawartości danego zasobu w jednej tonie złomu oraz światowych zasobów określonego zasobu.

Produktami wyjściowymi demontażu są części zdadne do ponownego użycia, związki metaliczne (włączając w to metale szlachetne) oraz elementy niebezpieczne. Dalszy przerób elementów polega na rozdrobnieniu w młynach oraz poddaniu uzyskanego granulatu procesom hydrometalurgicznym (celem jest wydzielenie metali) bądź selekcji z wykorzystaniem metod separacji [14].

Separację przeprowadza się, aby dokonać podziału pomiędzy rozdrobnionymi elementami, by w ten sposób uzyskać koncentrację poszczególnych frakcji. Podstawowe czynniki wpływające na efektywność separacji to kształt, rozmiar i sposób powiązania komponentów oraz materiałów. Można ją przeprowadzić, przy dużym stopniu rozdrobnienia, z wykorzystaniem różnicy wymiarów (zestaw sit), ciężaru właściwego (segregacja w cieczy, aby oddzielić metale od tworzyw sztucznych), własności elektrostatycznych, magnetycznych oraz na podstawie o prądów wirowych. Ostatni typ separacji opiera się na własnościach magnetycznych cząstek (ferromagnetyków) i ich oddziaływaniu z polem magnetycznym wyindukowanym przez przepływ prądu elektrycznego oraz ich zachowaniu, przykładowo, przy jednoczesnym działaniu siły odśrodkowej podczas wirowania [14].

Separacja elektrostatyczna opiera się na różnicy w przewodności prądu elektrycznego cząstek, co objawia się różnorodną zdolnością do przyjmowania ładunku, który ulega polaryzacji. Przykładowe urządzenie do separacji zostało schematycznie przedstawione na rysunku 4 [14, 37].



Rys. 4. Schemat ideowy separatora elektrostatycznego jonizującego

Fig. 4. Ionizing Electrostatic Separator Circuit Diagram

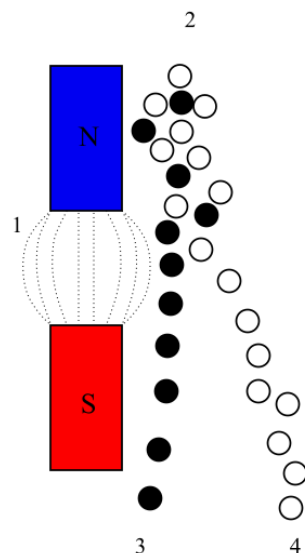
Źródło: na podstawie: Veit H.M, Diehl T.R., Salami A.P., Rodrigues J.S., Bernardes A.M., Teno'rio J.A.S., Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap, *Waste Management* (25) 2005, p. 67-74. Drzymała J.: *Podstawy mineralurgii*, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001

Przez podajnik (1) (może być wibracyjny, aby zapewnić swobodny przepływ ziaren) przekazuje się nadawę na taśmę nadawczą (2), która doprowadza cząstki na elektrodę walcową dodatnią (3) (ruch walca w przedstawionym przypadku jest przeciwny do ruchu wskazówek zegara), podłączoną do źródła prądu (7). Elektroda ujemna to elektroda jonizująca (4). Następnie, na podstawie różnych własności elektrycznych metali oraz tworzyw sztucznych, możliwy jest podział na materiały przewodzące (5) i nieprzewodzące (6) [37].

Separacja magnetyczna umożliwia podział materiałów ze względu na ich podatność magnetyczną, czyli cechę opisującą, jak cząstka oddziałuje z polem magnetycznym określonym przez takie wielkości fizyczne jak indukcja pola oraz jego natężenie. Cząstki separowane wprowadza się w niejednorodne pole magnetyczne, aby rozdzielić ferromagnetyki (silnie magnetyczne, podatność istnieje nawet przy braku oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego) od paramagnetyków (słabo magnetyczne, ich podatność zależy od własności pola na nie oddziałującego) czy diamagnetyków (ujemna podatność magnetyczna, niezależna od temperatury). Umieszczone w polu magnetycznym (1) ziarna materiału (nadawa, 2) oddziałują z nim, czego wynikiem jest wypychanie z pola ziaren o ujemnej podatności magnetycznej (odpad, 4), a wciąganie tych o dodatniej (koncentrat, 3). Zobrazowano to na rysunku 5 [36].

Zazwyczaj w praktyce wykorzystuje się kombinacje wymienionych metod, co zapewnia wysoki stopień separacji. Wiele produktów wyjściowych z poprzednich wymienionych faz procesów przetwarzania, ze szczególnym uwzględnieniem metali, wymaga dodatkowej

obróbki termicznej. Celem tego zabiegu jest zwiększenie czystości surowców. Większość z tych procesów nastawiona jest na odzysk miedzi, cyny czy ołowiu, polegają na ponownym przetapianiu, oczyszczaniu elektrolitycznym i pyrolizie [14]. Należy nadmienić, że te metody nie są przyjazne dla środowiska przez toksyczne produkty tych procesów, co nie wpisuje się w *circular economy*. Dlatego dąży się do opracowania alternatywnych, proekologicznych rozwiązań.



Rys. 5. Ideowy schemat separacji magnetycznej

Fig. 5. Schematic diagram of a magnetic separation

Źródło: na podstawie: Veit H.M, Diehl T.R., Salami A.P., Rodrigues J.S., Bernardes A.M., Teno'rio J.A.S., Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap, *Waste Management* (25) 2005, p. 67-74. Drzymała J.: *Podstawy mineralurgii*, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001

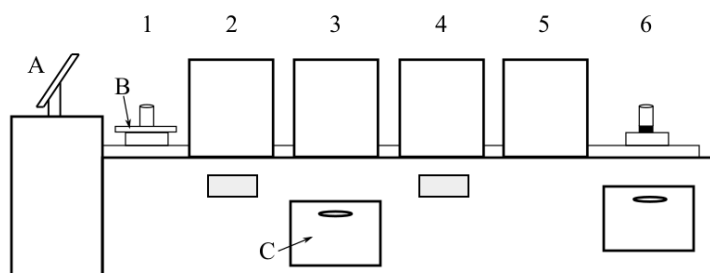
8. Przedstawienie metod recyklingu elektroodpadów opisanych w literaturze

8.1. Zautomatyzowana linia do demontażu płytek drukowanych

W poprzednim rozdziale poruszano zagadnienie demontażu PCB oraz scharakteryzowano różne metody działania. Już dwadzieścia lat temu podejmowano próby zaprojektowania w pełni automatycznego procesu demontażu, aby go przyspieszyć i unowocześnić przy zapewnieniu jak największej dokładności. Propozycję przedstawiła firma NEC Corporation. Na rysunku 6 pokazano schemat ideowy tego rozwiązania [34].

Kolejne stanowiska linii opisano cyframi od 1 do 6. Wprowadzanie parametrów oraz sprawdzanie poprawności przeprowadzania procesu następuje za pomocą komputera, oznaczonego na rysunku literą A. Płyta drukowana (B) jest montowana w uchwycie trzymającym ją w poziomej bądź pionowej pozycji (1). System usuwania komponentów

stanowią dwa zespoły podgrzewające (2 i 4) oraz dwa stanowiska usuwające (3 i 5). W pierwszej fazie próbki podgrzewa się w krótkim czasie do punktu topnienia lutowni, następnie na stanowisku numer trzy usuwa się część elementów przez ruch śmigieł i samej płytki, która obracana jest przez specjalne ramiona. Odzyskane elementy trafiają do przestrzeni oznaczonej literą C. Następnie podgrzewa się PCB do tej samej temperatury w dwukrotnie krótszym czasie i usuwa pozostałe elementy za pomocą śmigieł tnących. Opisany system opiera się na demontażu jednoczesnym i selektywnym [34].



Rys. 6. Zautomatyzowana linia demontażu

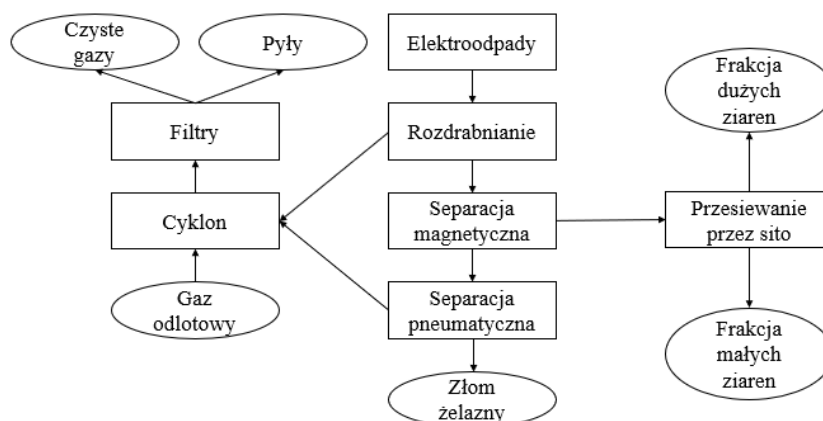
Fig. 6. Automated disassembly line

Źródło: opracowanie własne

8.2. Proces recyklingu i utylizacji elektroodpadów w Japonii

Jedną z typowych instalacji, zaprojektowaną do utylizacji oraz odzysku surowców z elektroodpadów, a także odpadów komunalnych (zgodnie z japońskim prawodawstwem za elektrośmieci uznaje się pralki, lodówki, klimatyzatory oraz telewizory, pozostałe klasyfikuje się jako odpady komunalne), znajduje się Hitachi w Japonii. Procesowi poddaje się zarówno elektroodpady wielkogabarytowe (lodówki, pralki), jak i małogabarytowe (odkurzacze, zegary), a także konsumenckie (sprzęt audio) czy oświetleniowe. Schemat działania zobrazowano na rysunku 7 [33].

Przed procesem z urządzeń wymontowuje się akumulatory oraz baterie. Następnie przystępuje się do rozdrabniania (na typowym rozdrabniaczu zwanym strzępiarką), separacji magnetycznej (po której uzyskany produkt dzieli się na frakcję małych i dużych ziaren, ziarna duże się spala, małe odprowadza bezpośrednio na składowisko), pneumatycznej (ma na celu rozdzielanie, z wykorzystaniem podmuchu powietrza, tworzyw sztucznych i metali – materiałów lekkich i cięższych, w tym przypadku wyłonienie złomu żelaznego); produktem tych działań jest złom żelazny. Podczas rozdrabniania i separacji pneumatycznej powstają gazy odlotowe, które następnie kieruje się na cyklon i filtry workowe, aby poddać je odpylaniu. Zgromadzone pyły przesiewane są na sitach, a te, które zostały na filtrach, przekazuje się do spalania [33].



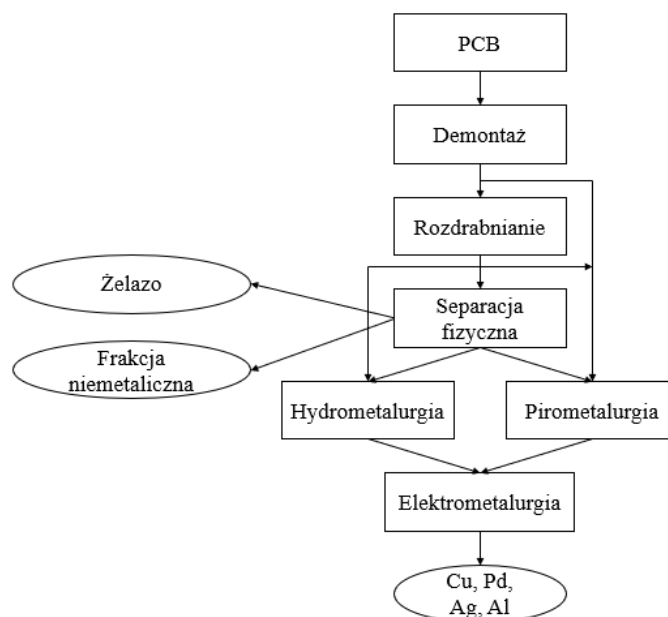
Rys. 7. Procesu recyklingu (Hitachi, Japonia)

Fig. 7. Recycling process (Hitachi, Japan)

Źródło: na podstawie: Woynarowska A., Żukowski W., Współczesne metody recyklingu odpadów elektronicznych, *Chemia Czasopismo Techniczne*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1Ch/2012, zeszyt 16, rok 109

8.3. Proces recyklingu i utylizacji elektroodpadów w UE

Rozwiązania wykorzystywane w krajach europejskich muszą być zgodne z dyrektywami wydanymi przez Unię Europejską. Przykładowy schemat działania, obrazujący proces odzysku surowców z elektroodpadów, zamieszczono na rysunku 8. Stanowi on połączenie metod fizycznej separacji oraz metod hydrometalurgicznych (odzyskiwanie metali z wodnych roztworów powstałych przez ługowanie – proces transportu fazy stałej do fazy ciekłej; podczas procesu nie powstają gazy ani pyły mogące zanieczyścić powietrze) a także pirometalurgicznych (dział metalurgii, który zajmuje się przerobem metali w temperaturach powyżej temperatury topnienia). Separacja fizyczna jest prostsza i wiąże się z niską szkodliwością dla środowiska, natomiast dwie kolejne wymienione metody mogą generować duże ilości związków toksycznych – odpady i ścieki – gdzie konieczne staje się ich oczyszczenie, co wiąże się z wysokimi kosztami (zakup specjalistycznej aparatury) [33].



Rys. 8. Procesu recyklingu (Włochy)

Fig. 8. Recycling process (Italy)

Źródło: na podstawie: Woynarowska A., Żukowski W., Współczesne metody recyklingu odpadów elektronicznych, *Chemia Czasopismo Techniczne*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1Ch/2012, zeszyt 16, rok 109

8.4. Badania dotyczące połączenia separacji magnetycznej oraz elektrostatycznej

Celem badań opisanych w artykule z 2004 roku pod tytułem *Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap* było znalezienie alternatywnych metod odzysku miedzi dla hydrometalurgii oraz pirometalurgii, które wymagałyby mniejszego nakładu energetycznego i finansowego, a przede wszystkim maksymalnie niwelowałyby emisję szkodliwych substancji. Eksperyment oparty został na metodach fizycznej separacji, jego etapy były następujące: rozdrobnienie, separacja ze względu na wielkość frakcji ziarnowej, separacja magnetyczna oraz elektrostatyczna. Materiał do badań pochodził z komputerów, wykorzystano 3 kg PCB oraz 4 kg zdemontowanych z płytek komponentów (EC) [37].

Na drodze podgrzewania usunięto z PCB urządzenia, wynikiem czego uzyskano dwie frakcje złomu: płyty drukowane oraz komponenty elektroniczne. Pozostały materiał do badań podzielono na dwie grupy – PCB pochodzące z nowoczesnego sprzętu oraz starszej generacji. Rozdrabnianie przeprowadzono w młynie laboratoryjnym aż do uzyskania cząstek o wielkości poniżej 1 mm. Proszek podzielono na trzy klasy ziarnowe (F1, F2 i F3): $F1 < 0,25$ mm, $F2 \in <0,25; 0,5$ mm oraz $F3 \in <0,5; 1$ mm [37].

Podczas separacji magnetycznej dla każdej klasy ziarnowej największa indukcja magnetyczna pola wynosiła 0,65 T, minimalna – 0,6 T. W wyniku procesu podzielono ziarna na magnetyczne i niemagnetyczne. Następnie klasę niemagnetyczną skierowano na separację elektrostatyczną, aby rozdzielić materiały przewodzące i nieprzewodzące. Głównym celem

tego etapu był odzysk miedzi lub aluminium z kabli i przewodów elektrycznych oraz miedzi i innych pierwiastków metalicznych z PCB. Wykorzystano separator elektrostatyczny z jonizacją. Od opisanego wcześniej separatora elektrostatycznego różni się on obecnością dwóch osobnych elektrod, niemających bezpośredniego kontaktu z materiałem oddzielanym, obracający się walec jest uziemiony, nie przewodzi prądu. W tabeli 3 zamieszczono parametry separacji [37].

Tabela 3

Parametry separacji elektrostatycznej

Parametr	Wartość
Elektroda jonizująca	Odległość od walca: 25 cm
Druga elektroda (statyczna)	Odległość od walca: 25 cm
Prędkość obrotowa walca	85 obr/min
Napięcie	45 – 46 V

Źródło: Veit H.M, Diehl T.R., Salami A.P., Rodrigues J.S., Bernardes A.M., Teno'rio J.A.S., Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap, Waste Management (25) 2005, p. 67-74

Finalnie każda grupa (magnetyczna, przewodząca i nieprzewodząca z poszczególnych frakcji ziarnowych) została roztworzona w wodzie królewskiej, otrzymane próbki zbadano z wykorzystaniem metod spektroskopowych – AAS [27]. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4

Wyniki eksperymentu

	PCB	EC
Produkt separacji magnetycznej	43% Fe	46% Fe
Produkt separacji elektrostatycznej	50% Cu 25% Sn 7% Pb	46% Cu 23% Sn 8% Pb

Źródło: Veit H.M, Diehl T.R., Salami A.P., Rodrigues J.S., Bernardes A.M., Teno'rio J.A.S., Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap, Waste Management (25) 2005, p. 67-74

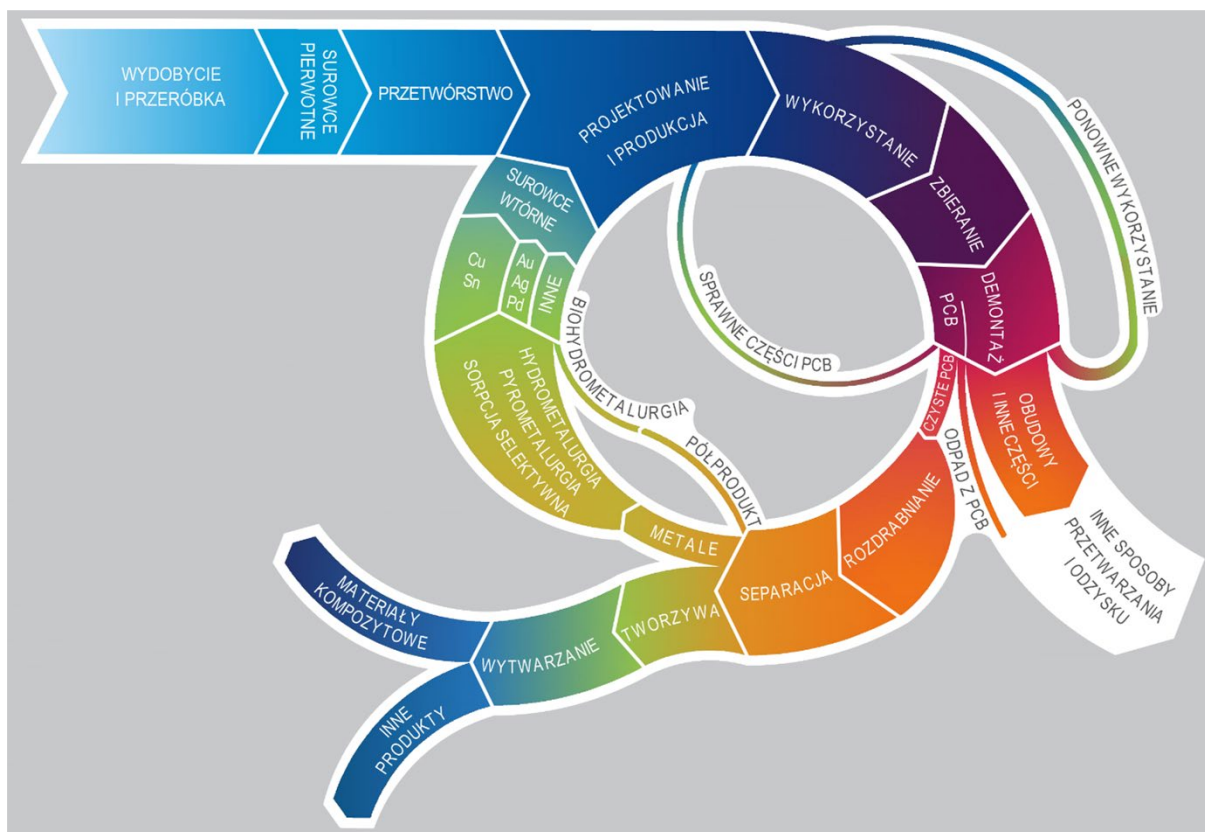
Zdaniem autorów publikacji opisana metodologia działania umożliwia skuteczny odzysk metali, uzyskane zawartości procentowe metali są względnie wysokie [37].

Kolejna próba recyklingu PCB została przeprowadzona przez współautorów niniejszej publikacji T. Suponika i D. Frankego, którzy przeprowadzili badania w poszukiwaniu przyjaznej dla środowiska i efektywnej technologii odzysku metali z kompozytu PCB typu FR4. W pracach skupiono się na metodach wykorzystujących procesy fizyczne z uwagi na ich znikomy wpływ na środowisko przyrodnicze i wysoki potencjał zastosowania. Zbadano możliwość recyklingu PCB za pomocą separacji elektrostatycznej [38], separacji grawitacyjnej [39] i flotacji [40]. Najbardziej efektywną metodą okazała się separacja elektrostatyczna, w wyniku której otrzymano ok. 26% koncentratu metali, 71% niemetalicznej części kompozytu

PCB i blisko 3% półproduktu zawierającego ziarna (konglomeraty) zbudowane z metali i tworzyw sztucznych. Newralgicznym elementem badań było rozdrabnianie, które zostało przeprowadzone w młynie nożowym z zastosowaniem ciekłego azotu, dzięki czemu uzyskano wysoki stopień uwolnienia metali. W efekcie przeprowadzonych badań autorzy opracowali koncepcję technologii recyklingu zużytych PCB, która została zweryfikowana na poziomie laboratoryjnym (rysunek 8).

Zaproponowana technologia zakłada trzy podstawowe etapy. Pierwszym z nich jest przygotowanie PCB do rozdrabniania przez demontaż z powierzchni płyt elementów elektronicznych, które mogłyby zanieczyścić powstające produkty rozdziału oraz zakłócić proces rozdrabniania i separacji z uwagi na zawarte w nich ciecze i ich właściwości fizyczne. W ramach tego etapu wstępnie oczyszczone PCB należy rozdrobnić w dezintegratorze w celu uzyskania kawałków o maksymalnych wymiarach 3 cm x 3 cm. Drugim etapem jest mielenie kawałków PCB w temperaturach kriogenicznych za pomocą młyna nożowego. Ostatnim krokiem jest rozdział metali od pozostałych części PCB za pomocą bębnowego separatora elektrostatycznego. W wyniku tego procesu otrzymuje się mieszaninę metali i tworzywa sztuczne oraz niewielkie ilości półproduktu.

Koncentrat metali oraz produkt zawierający tworzywa sztuczne charakteryzują się wysoką czystością i są niezmiennie chemiczne, dzięki temu potencjał do ich ponownego wykorzystania jest znacznie większy. Wartościowa mieszanina metali może zostać sprzedana do lokalnych zakładów zajmujących przetwarzaniem rud metali, natomiast tworzywa sztuczne mogą być wykorzystane do produkcji materiałów kompozytowych, np. z zastosowaniem żywicy epoksydowej lub poliestrowej (zgłoszenie patentowe nr P.422604). Z kolei odzysk metali z niewielkich ilości półproduktu można być prowadzony przy użyciu metod biohydrometalurgicznych opisanych w kolejnej części niniejszej pracy. Dzięki temu zaproponowaną przez autorów technologię można uznać za zgodną ze zrównoważonym rozwojem i z gospodarką o obiegu zamkniętym.



Rys. 9. Koncepcja technologii przetwarzania zużytych płyt odwodów drukowanych typu FR-4 zgodnej z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym i zrównoważonego rozwoju

Fig. 9. The concept of technology for processing used PCBs (FR-4 type) in conformity with the circular economy idea and sustainable development

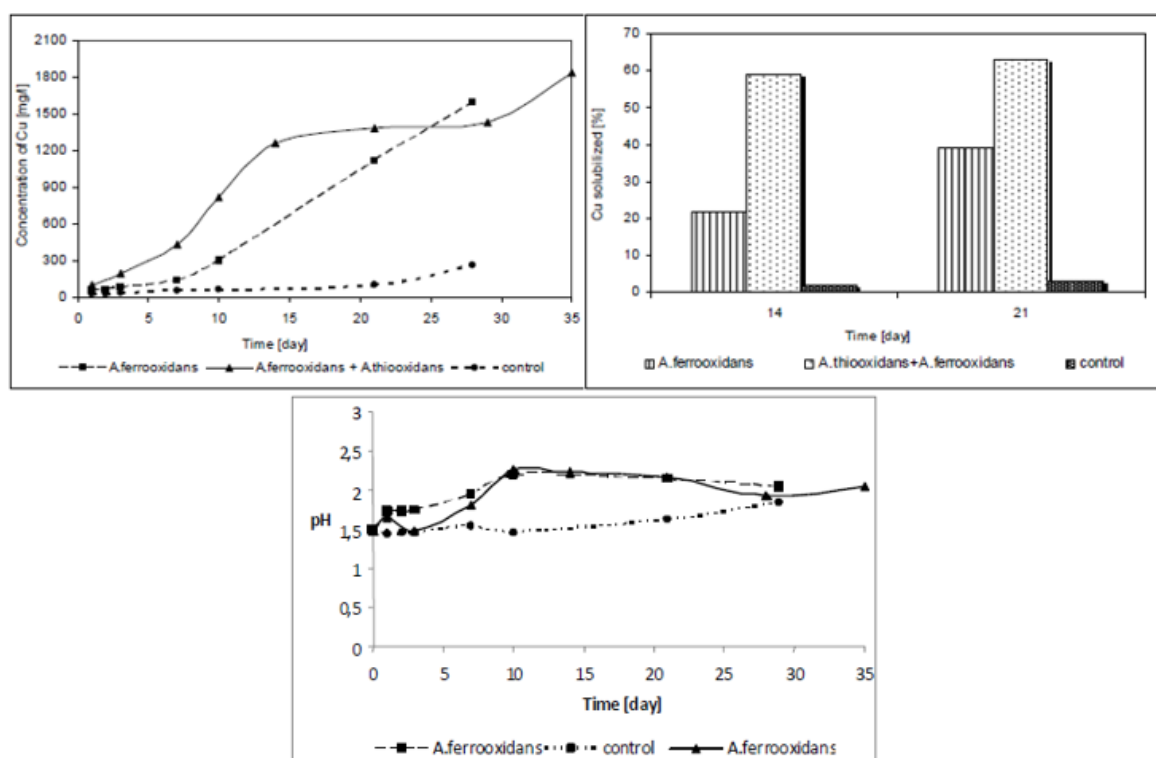
Źródło: opracowanie własne [D. Franke, T. Suponik]

8.5. Badania z zakresu odzysku metali z roztworu z wykorzystaniem bakterii

Biohydrometalurgia to dział metalurgii, którego zagadnienia związane są z wydzielaniem metali z wykorzystaniem naturalnych procesów biochemicznych z udziałem mikroorganizmów. W artykule pod tytułem *Influence of Bacterial Culture to Copper Bioleaching from Printed Circuit Boards* opisano, w jaki sposób określone rodzaje bakterii umożliwiają wydzielenie metali ze zmielonego PCB, po uprzednim umieszczeniu proszku w kolbie ze szczepem bakterii oraz odpowiednią pożywką. Eksperyment trwał 35 dni. Źródła literaturowe podają, iż niektóre rodzaje bakterii giną przy zbyt dużym stężeniu metali, badania potwierdzają jednak, że na organizmy z grupy *acidithiobacillus* nie ma to destrukcyjnego wpływu, dlatego mogą być przeznaczone do procesu bioługowania (wykorzystuje się w nim właściwości i cechy mikroorganizmów w celu wyekstrahowania różnych pierwiastków z rud). Bioługowanie zastosowane w wieloetapowym procesie recyklingu może zwiększyć wydajność całego przedsięwzięcia, jako metoda uzupełniająca. Procesy termiczne i fizykochemiczne okazują się niewystarczająco efektywne przy odzysku miedzi, znacznie lepiej sprawdza się w tym obszarze zastosowanie mikroorganizmów. *A. ferrooxidans* oraz

A. thiooxidans podczas wzrostu wykorzystują żelazo oraz siarkę elementarną, wytwarzając jony żelaza bądź kwas siarkowy, będące istotnymi czynnikami ługującymi przy odzysku metali ze źródeł pierwotnych i wtórnych [41].

Eksperyment obejmował trzy stanowiska – szczep *A. ferrooxidans* umieszczony w kolbie z pożywką oraz odpowiednią ilością zmielonego PCB, szczepy *A. ferrooxidans* z *A. thiooxidans* umieszczone w jednej kolbie z pożywką oraz odpowiednią ilością zmielonego PCB, grupa kontrolna, pożywka ze zmielonym PCB, bez wprowadzania bakterii. Regularnie badano oraz notowano zmianę poziomu pH, jak również zawartość miedzi w roztworze. Skład pożywek oparty był na kompozycji związków chemicznych sprzyjających wzrostowi bakterii. Wyniki testów zamieszczono na rysunku 9 [41].



Rys. 10. Krzywe zmiany zawartości miedzi (lewa strona), procentowa zawartość miedzi w dniu czternastym i dwudziestym pierwszym (prawa strona), zmiana odczynu pH (poniżej)

Fig. 10. Copper content curves (left), copper percent on days 14 and 21 (right), pH change (above)

Źródło: Mražíková A., Marcinčáková R., Kaduková J., Velgosová O., Influence of Bacterial Culture to Copper Bioleaching from Printed Circuit Boards, Journal of the Polish Mineral 62 Engineering Society, July-December 2013

Przedstawione wyniki jednoznacznie wskazują, że w próbie zawierającej mieszane szczepy bakterii proces był bardziej efektywny, uzyskano znacznie wyższą procentową zawartość miedzi. Krzywe pokazują liniową tendencję zmiany zawartości procentowej przy zastosowanym jednolitym szczepie bakterii. Odnosząc się do wartości pH, na wykresie zauważyć można stopniowy wzrost oraz osiągnięcie maksimum w dniu dziesiątym, po czym stopniowo malały, aż do ustabilizowania wartości w okolicach 2 (środowisko kwaśne) [41]. Zestawiając uzyskane rezultaty z opisanym w rozdziale 4.3 odzyskiem metodami

separacyjnymi zauważyć można, że (jak się spodziewano) odzyskano większą ilość miedzi (metody fizyczne: 46 – 50%, bioługowanie: około 60%).

Analizę produktów bioługowania z wykorzystaniem metod spektrometrii, mikroskopii oraz rentgenografii strukturalnej autorzy niniejszej publikacji przedstawili w artykule *Morphology, phase and chemical analysis of leachate after bioleaching metals from printed circuit boards*. Badaniom poddano roztwory otrzymane po bioługowaniu przez 64 dni (szczep bakterii *A. ferrooxidans*) zmielonych PCB (półprodukt po separacji elektrostatycznej). W roztworze zidentyfikowano pierwiastki wchodzące w skład płyt obwodów drukowanych (Cu, Al, Mo, Ca, Ag, Mg, Si), a także żelazo, którego utlenianie zapewnia ciągłość ługowania, oraz fazy siarczkowe i tlenkowe (Fe_2O_3 , Cu_2O , CuFeS_2) – produkty metabolizmu bakterii. Zaproponowany w publikacji zestaw badań pozwala na zebranie kompleksowych informacji podczas optymalizacji procesu bioługowania półproduktów jako składowa recyklingu PCB [42].

Próby odzysku tworzyw sztucznych

Autorzy artykułu *A Review on printed circuit boards waste recycling technologies and reuse of recovered non-metallic materials* w swojej pracy przybliżają problematykę odpadów niemetalicznych, będących pozostałością recyklingu surowców metalicznych z PCB, proponując możliwości ich utylizacji [43].

Jedną ze wskazanych alternatyw jest ponowna aplikacja tworzyw sztucznych jako wypełniaczy do materiałów budowlanych, elementów dekoracyjnych, klejów czy materiałów izolacyjnych, gdzie w przypadku materiałów dla budownictwa wiązałoby się to ze zmniejszeniem ciężaru właściwego konstrukcji przy zachowaniu, czy nawet poprawie, własności mechanicznych. Następną atrakcyjną propozycją jest zastosowanie nienasyconej żywicy poliestrowej jako środka wiążącego, ze względu na niską lepkość, szybkie utwardzanie, doskonałą odporność chemiczną oraz niski koszt [43].

Wskazana żywica może być również wykorzystana do wytwarzania desek kompozytowych, szeroko stosowanych w takich dziedzinach jak motoryzacja, sprzęt rozrywkowy materiały dekoracyjne czy przybory kuchenne. Tego typu deski często wykazują się kompatybilnością z klejami na bazie żywicy epoksydowej ze względu na zastosowanie tej żywicy jako wypełniacza do włókien, co poszerza zakres aplikacji. Dokonano porównania własności przykładowych desek z wariantami stosowanymi do tej pory (z dodatkiem talku i krzemionki); wyniki były obiecujące – udało się zwiększyć wytrzymałość o zginanie aż o 50% przy zawartości 15% frakcji niemetalicznej z PCB, co sugeruje potencjalne możliwości aplikacyjne w warunkach, w których wysoka wytrzymałość na zginanie jest szczególnie poszukiwaną cechą (sprzęt sportowy). Interesująca jest również propozycja dodatku wspomnianego proszku niemetalicznego do materiałów konstrukcyjnych zamiast wspomnianych talku i krzemionki [43].

Mimo obiecujących wyników badań w dalszym ciągu należy kontynuować prace oraz dołożyć wszelkich starań, aby znaleźć szerszy obszar zastosowań; takie działania wiązałyby się przede wszystkim z ochroną środowiska oraz ze zmniejszeniem nakładów finansowych, niezbędnych do produkcji różnego typu materiałów kompozytowych [43].

9. Podsumowanie

Istnieje wiele możliwości unowocześnienia procesu odzysku materiałów ze zużytych PCB, polegających na wprowadzeniu pełnej automatyzacji poszczególnych etapów recyklingu, analizie wpływu parametrów metod separacji na efektywność odzysku oraz badań dotyczących zastosowania nowych metod, będących uzupełnieniem już istniejących rozwiązań albo zastępujących aktualne procedury. Niewielu badaczy zajmuje się tym zagadnieniem, co można wnioskować po małej ilości dostępnych artykułów naukowych z owej dziedziny – w literaturze dominują przeglądy stosowanych już metod przetwórstwa. Istnieje wiele niedoskonałości w samym procesie odzysku materiałów z PCB. Wiele metod jest mało efektywnych, ponieważ nie pozwalają one na satysfakcjonujący odzysk metali spowodowane jest to złożonością budowy PCB. Wykorzystywane procesy niejednokrotnie mają negatywny wpływ na środowisko ze względu na emisję szkodliwych substancji, na przykład podczas spalania (pyroliza). Idea gospodarki obiegu zamkniętego, uwzględniająca wytworzenie materiału oraz jego utylizację/odzysk pojedynczych materiałów składowych, wpisuje się w pojęcie zrównoważonego rozwoju, które w obliczu zmian klimatycznych oraz systematycznie kończących się zasobów naturalnych staje się coraz bardziej popularne i wręcz konieczne do zastosowania. Obiecujące w kontekście zrównoważonego rozwoju są metody separacji elektrostatycznej, flotacji oraz biohydrometalurgia, jako jeden z członów procesu recyklingu do przetwarzania półproduktu.

Bibliografia

1. Xavier L.H., Giese E.C., Ribeiro-Duthie A.C., Lins, F.A.F., Sustainability and the Circular Economy: A Theoretical Approach Focused on e-Waste Urban Mining. *Resour. Policy* 2021, 74, 101467.
2. Araujo Galvão G.D., de Nade J., Clemente D.H., Chinen G., de Carvalho M.M., Circular Economy: Overview of Barriers. *Procedia CIRP* 2018, 73, 79-85.
3. Morsetto P., Targets for a Circular Economy. *Resour. Conserv. Recycl.* 2020, 153, 104553.

4. Dantas T.E.T., de-Souza E.D., Destro I.R., Hammes G., Rodriguez C.M.T., Soares S.R., How the Combination of Circular Economy and Industry 4.0 Can Contribute towards Achieving the Sustainable Development Goals. *Sustain. Prod. Consum.* 2021, 26, 213-227.
5. Yu D.E.C., Yu K.D.S., Tan R.R., Implications of the Pandemic-Induced Electronic Equipment Demand Surge on Essential Technology Metals. *Clean. Responsible Consum.* 2020, 1, 100005.
6. International Data Corporation Traditional PC Shipments Continue to Grow Amid Global Economic Slowdown, According to IDC Available online: <https://www.businesswire.com/news/home/20200709005963/en/Traditional-PC-Shipments-Continue-to-Grow-Amid-Global-Economic-Slowdown-According-to-IDC> [accessed on: 28 December 2022].
7. GamesIndustry.biz, Dring C., What Is Happening with Video Game Sales during Coronavirus Available online: <https://www.gamesindustry.biz/what-is-happening-with-video-game-sales-during-coronavirus> [accessed on: 28 December 2022].
8. Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., The Global E-Waste Monitor 2020: Quantities, Flows and the Circular Economy Potential. U. N. Univ. UNUUnited Nations Inst. Train. Res. UNITAR – Co-Hosted SCYCLE Programme Int. Telecommun. Union ITU Int. Solid Waste Assoc. ISWA 2020, 1-120.
9. Dutta D., Arya S., Kumar S., Lichtfouse E., Electronic Waste Pollution and the COVID-19 Pandemic. *Environ. Chem. Lett.* 2022, 20, 971-974, doi:10.1007/s10311-021-01286-9.
10. Mir S., Dhawan N.A, Comprehensive Review on the Recycling of Discarded Printed Circuit Boards for Resource Recovery. *Resour. Conserv. Recycl.* 2022, 178, 106027.
11. LaDou J., Printed circuit board industry, *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 209 (2006), s. 211-219.
12. Geier M.J., Jak naprawić sprzęt elektroniczny poradnik dla nieelektronika, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2013.
13. Materiały firmy Solitech, <https://solitech.pl/obwody-drukowane.html> [dostęp: 23.02.2023 r.].
14. Kornacki W., Recykling płytek drukowanych, materiały pokonferencyjne: II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „EKOLOGIA W ELEKTRONICE”, Warszawa, 5-6.12.2002.
15. Materiały firmy Nanotech Elektronik Sp. z o.o.: <http://www.nanotech-elektronik.pl/index.php/pl/info/materiały> [dostęp: 24.01.2020 r.].
16. Opis płyty głównej komputera: <https://olimp.wroclaw.pl/slownik/plyta-glowna> [dostęp: 24.02.2023 r.].
17. Artykuł: Płytki drukowane do układów w. cz., portal branżowy ElektronikaB2B <https://elektronikab2b.pl/technika/19215-plytki-drukowane-do-ukladow-w.cz.> [dostęp: 23.02.2023 r.].

18. Załęski D., Obwody z rdzeniem aluminiowym – parametry, zastosowania, projektowanie, portal branżowy ElektronikaB2B, <https://elektronikab2b.pl/prezentacje/21204-obwody-z-rdzeniem-aluminiowym-parametry-zastosowania-projektowanie#.UxgY8IW0PPs> [dostęp: 23.02.2023 r.].
19. Jaworska M., Z jakich materiałów wykonuje się elastyczne PCB?, portal branżowy ElektronikaB2B, <https://elektronikab2b.pl/technika/29537-z-jakich-materialow-wykonuje-sie-elastyczne-pcb> [dostęp: 23.03.2023 r.].
20. Kręciejewski M., Poradnik elektronika: co powinniśmy wiedzieć o płytkach drukowanych? <https://mikrokontroler.pl/2011/07/19/poradnik-elektronika-co-powinnismy-wiedziec-o-plytkach-drukowanych/2/> [dostęp: 25.01.2023 r.].
21. Materiały firmy Solitech, <https://solitech.pl/pcb.html> [dostęp: 23.01.2023 r.].
22. Menad N., Van Houwelingen J., Identification and recovery of rare metals in electric and electronic scrap: a review, Tirthteenth International Waste Management and Landfill Symposium, 2011.
23. Akcil A., Erust C., Sekhar Gahan C., Ozgun M., Sahin M., Tuncuk A., Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non – cyanide lixivants – a review, *Waste Management* 45 (2015), p. 258-271.
24. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE).
25. Raport: Analiza sytuacji na rynku gospodarowania zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym oraz rekomendacje *Gospodarka elektroodpadami. Wyzwania na lata 2019-2023*, przygotowany przez Organizację Odzysku Sprzętu Elektrycznego i Elektronicznego SA ElektroEko, Cyfrowa Polska, Związek Pracodawców AGD APPLIA: <https://www.teraz-srodowisko.pl/media/pdf/aktualnosci/7847-ElektroEko-raport-elektrosmieci-2019.pdf> [dostęp: 4.04.2023 r.].
26. Wywiad z wiceministrem środowiska – Sławomirem Mazurkiem: <https://innowacje.newseria.pl/news/sprzet-elektroniczny-ma,p1885047481> [dostęp: 15.03.2023 r.]
27. Komunikat Komisji Do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego I Komitetu Regionów *Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program "zero odpadów" dla Europy*, Bruksela, dnia 2.7.2014 r. COM(2014) 398.
28. Schemat obrazujący ideę gospodarki obiegu zamkniętego, który stanowi wzór dla tego umieszczonego w pracy <https://applia.pl/nasze-stanowisko-do-mapy-drogowej-goz/> [dostęp: 4.03.2023 r.].
29. Cieszyńska A., *Waste electronic and electrical equipment (WEEE) – scraps or valuable source of precious metals*, *Towaroznawcze Problemy Jakości*, 4(49)/2016.
30. Gołąbek A.: *Zmiany w gospodarowaniu odpadami w postaci zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego – nowa dyrektywa unijna*, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, nr 3(517), maj-czerwiec 2014.

31. Artykuł opisujący nieprawidłowości w przetwórstwie WEEE: <https://businessinsider.com.pl/wiadomosci/elektrosmieci-w-polsce-raport-nik/fz5kd53> [dostęp: 15.03.2023 r.].
32. Sytuacja związana ze zbieraniem oraz przetwarzaniem WEEE w Polsce i Europie, <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/ZSEE-elektroodpady-elektrosmieci-recykling-7847.html> [dostęp: 4.04.2023 r.].
33. Woynarowska A., Żukowski W., Współczesne metody recyklingu odpadów elektronicznych, *Chemia Czasopismo Techniczne*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1Ch/2012, zeszyt 16, rok 109.
34. Li J., Shrivastava P., Gao Z., Zhang H.-Ch., Printed Circuit Board Recycling: A State-of-the-Art Survey, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 27, no. 1, January, 2004.
35. Macko M., Metoda doboru rozdrabniaczy do materiałów nie kruchych, *Inż. Ap. Chem.*, 2010, 49.5.
36. Drzymała J.: Podstawy mineralurgii, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
37. Veit H.M, Diehl T.R., Salami A.P., Rodrigues J.S., Bernardes A.M., Teno' rio J.A.S., Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap, *Waste Management* (25) 2005, p. 67-74.
38. Suponik T., Franke D., Nuckowski P., Matusiak P., Kowol D., Tora B., Impact of Grinding of Printed Circuit Boards on the Efficiency of Metal Recovery by Means of Electrostatic Separation. *Minerals*, 2021, 11, 281, DOI:10.3390/min11030281.
39. Franke D., Suponik T., Nuckowski P., Dubaj J., Evaluation of the Efficiency of Metal Recovery from Printed Circuit Boards Using Gravity Processes. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2021, 57, 63-77, DOI:10.37190/ppmp/138471.
40. Franke D.M., Kar U., Suponik T., Siudyga T., Evaluation of the Use of Flotation for the Separation of Ground Printed Circuit Boards. 2022, DOI:10.24425/GSM.2022.140605.
41. Mražíková A., Marcinčáková R., Kaduková J., Velgosová O., Influence of Bacterial Culture to Copper Bioleaching from Printed Circuit Boards. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, July-December 2013.
42. Hyra K., Nuckowski P.M., Willner J., Suponik T., Franke D., Pawlyta M., Matus K., Kwaśny W., Morphology, Phase and Chemical Analysis of Leachate after Bioleaching Metals from Printed Circuit Boards. *Materials* 2022, 15, 4373.
43. Sohaili J., Muniyandi S.K., Mohamad S.S., A Review on printed circuit boards waste recycling technologies and reuse of recovered nonmetallic materials, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 3, Issue 2, February, 2012.

**PRZEGLĄD PIŚMIENICTWA Z ZAKRESU GOSPODAROWANIA
ELEKTROODPADAMI ORAZ METOD ODZYSKU METALI Z PŁYT OBWODU
DRUKOWANEGO (PCBS)**

Streszczenie

Treść publikacji obejmuje przegląd dostępnej literatury i aktów prawnych z zakresu gospodarowania elektroodpadami (WEE) oraz stosowanych metod odzysku metali z płyt obwodu drukowanego. Znajdują się w niej zagadnienia opisujące budowę PCB, ich skład materiałowy, podział metod odzysku wraz z charakterystyką wybranych metod (separacja elektostatyczna, magnetyczna, biohydrometalurgia). Zwrócono również uwagę na aspekty gospodarcze, ekonomiczne i przemysłowe związane z *circular economy*, wskazując na elementy idei zrównoważonego rozwoju, w myśl czego racjonalne gospodarowanie odpadami przynosi pozytywne rezultaty zarówno pod względem ekonomicznym, jak i ochrony środowiska, zachowując zasoby naturalne dla przyszłych pokoleń.

Słowa kluczowe: płyta obwodu drukowanego (PCB), recykling, odzysk materiałów, gospodarka o obiegu zamkniętym, zrównoważony rozwój

**A CASE STUDY OF LITERATURE IN THE FIELD OF ELECTRONIC WASTE
MANAGEMENT AND METALS RECOVERY METHODS FROM PRINTED
CIRCUIT BOARDS (PCBS)**

Abstract

The content of the paper includes a case study of electro-waste management and the methods of metals recovery from printed circuit boards, in accordance with available literature and legal acts. Publication consist of issues describing the PCBs structure, their material composition, the division of recovery methods with characteristic of selected methods (electrostatic and magnetic separation, bioleaching). Attention was also paid to the economic and industrial aspects related to the *circular economy*, pointing to the sustainable development idea. According to this approach, rational waste management brings positive results, both in economic and environmental terms, protecting natural resources for future generations.

Keywords: printed circuit board (PCB), recycling, materials recovery, circular economy, sustainable development

Amjad IQBAL¹

AN OVERVIEW OF THE CURRENT STATUS AND EMERGING TRENDS IN THERMALLY SPRAYED BARRIER COATINGS

1. Introduction

The authors admit that there are currently a number of top-notch review studies on thermal barrier coatings. However, they feel that a comprehensive comparison of the state of the subject at the moment and a discussion of cutting-edge future directions have not yet been made [1-4]. Enhancing efficiency and reducing fuel consumption and CO₂ emissions are two major factors driving the development of improved thermal barrier coatings. Operating temperatures have been significantly raised over time thanks to advancements in structural materials such wrought, conventionally cast, directionally solidified, and single-crystal alloys [5]. Using thermal barrier coatings in conjunction with cutting-edge cooling techniques can also significantly raise the temperature. Alternately, the use of TBCs might lower the temperature of the substrate and enhance the basic thermal properties. Hence these technologies are still getting improve day by day via research in various fields.

The development of thermal barrier coatings (TBCs) started in the 1950s with enamel coatings and progressed to partially yttria-stabilized zirconia (YSZ) in the 1980s, which has been the standard material for TBC applications for four decades [6]. YSZ has unique properties that make it suitable for TBC systems, including low thermal conductivity, high thermal expansion coefficient, and good processability [7]. YSZ also has high fracture toughness, which is critical for future developments in TBCs. Thermal spray methods and electron beam-physical vapor deposition (EBPVD) are two commercially used methods for TBC manufacture. EBPVD produces columnar structured topcoats with a high strain tolerance and is used in the first row of the high-pressure turbine of aero engines. The atmospheric plasma spraying (APS) technique used for thermal spraying, which allows for the manufacture of various coatings. The high enthalpy of the plasma plume makes it possible to fully melt high-melting-point YSZ powder, leading to efficient deposition of coatings. The process enables the production of porous and

¹ amjad.iqbal@polsl.pl, Department of Materials Technologies, Silesian University of Technology, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland, <http://strona.polsl.pl/>

micro-cracked coatings as well as segmented coatings, and different features are discussed in relation to their properties in the as-processed condition, as well as how they are affected by sintering or corrosion from molten silicate deposits [8].

In addition to the bond coat, the substrate material is also important in the performance of TBC systems. Nickel-based superalloys are commonly used as substrate materials due to their high-temperature strength and resistance to oxidation and corrosion. However, ceramic matrix composites (CMCs) are also being developed as potential substrate materials for TBC systems due to their low thermal conductivity and high-temperature mechanical properties [9].

Overall, the development of TBC systems has enabled the use of high-temperature materials in a wide range of applications, including gas turbine engines, diesel engines, and aerospace components. The use of TBCs has increased the efficiency and reliability of these applications, leading to reduced emissions and improved performance. Ongoing research and development in the field of TBCs will continue to push the limits of high-temperature materials and expand their use in new applications.

2. Advance TBCs Materials

The gas turbine engine industry is facing a challenge of continuously increasing hot gas temperature demand, which requires alternative ceramic materials for the partially yttria-stabilized zirconia TBC topcoat. Various materials have been investigated, including yttria-stabilized zirconia with additional dopants such as titania, tantala, fully stabilized zirconia with yttria or ceria, zirconia stabilized with multiple components in addition to yttria such as Nd_2O_3 , Gd_2O_3 , Sm_2O_3 , and Sc_2O_3 , pyrochlores and fluorites, perovskites, aluminates, phosphates, and high-entropy oxides [10-15].

The properties of these alternative ceramic materials or coatings, such as thermal conductivity and coefficient of thermal expansion, are compared to partially yttria-stabilized zirconia. Low thermal conductivity is desirable to ensure maximum thermal insulation, while the expansion coefficient should be as close as possible to the substrate material to minimize stresses can be predicted by Table 1 [16]. In addition, high-temperature phase stability, high sintering onset temperature, high fracture toughness, low elastic modulus, and chemical compatibility with TGO alumina and YSZ are essential requirements to meet.

Overall, the development of alternative ceramic materials for TBC topcoat is a complex and challenging task that requires a careful balance of multiple properties and requirements.

The second group of materials with low thermal conductivity for TBCs includes zirconates and mixed (rare earth metal) REM zirconates with a pyrochlore structure. These materials have been researched for their potential to improve TBC performance, with some success in reducing thermal conductivity. However, the pyrochlore structure of these materials makes them

challenging to process and apply as coatings, and further research is needed to determine their viability for TBCs.

YSZ doping with a series of REM oxides has received significant attention in the literature. By adding cations with smaller and larger ionic radii to zirconium dioxide, defect clusters are formed in the material. These clusters consist of larger and smaller REM cations, while yttrium cations are uniformly distributed. These clusters effectively dissipate phonons and decrease the thermal conductivity of the material to around 1 W/m·K. In addition, the doping of ZrO₂ with several cations can stabilize the coating's tetragonal structure at high temperatures and for long periods without transferring to a monoclinic structure during cooling [17-18].

Replacing some of the zirconium in YSZ with hafnium, which is always present as an admixture, can improve the service life of the coating and suppress its sintering. The addition of hafnium can also increase the thermal expansion coefficient, which is desirable for TBCs. Some ZrO₂-Ln₂O₃ materials for TBCs are listed in Table 1, highlighting the different combinations of rare earth metals and their effects on thermal conductivity and other TBC properties [19].

Table 1

Coefficient of thermal expansion (CTE) vs. thermal conductivity of different TBC topcoat materials [16-19]

Material	Deposition/ production technique	Thermal conductivity, W · m ⁻¹ · K ⁻¹	Thermal expansion coefficient α , 10 ⁻⁶ · K ⁻¹	Heat resistance
ZrO ₂ · 4% Gd ₂ O ₃	APS	2.25–2.0 (150–650°C)		The coating sinters worse, but the t' phase decomposes easier than YSZ
ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ -La ₂ O ₃	APS	1.3–1.4	9–10	50 cycles 1100–25°C
Zr(Sm)O ₂	Chemical	1.41–1.86 (600–25°C)		
Zr(Ce,Y)	APS		12.64–10.69 (50–900°C)	In the performance process, Ce changes its valency
Zr(Gd)O ₂	Ceramic	2.1–1.8 (200–1000°C)		
Zr(Y,Yb)O ₂	APS	1.52–1.19		
Zr(Sc,Y)O ₂	APS			The nanostructured material has higher thermal stability than 7YSZ
Zr(Y,Dy)O ₂	Ceramic	2.3	10.8–16 (400–900°C)	

Despite its advantages, the YSZ coating has several drawbacks. Firstly, it has a limited upper operating temperature of 1200°C. Secondly, it is sensitive to hot corrosion caused by the use of insufficiently pure fuel grades containing V₂O₅ and Na₂SO₄. Thirdly, the coating contains SiO₂ admixtures that diffuse along the grain boundaries during thermal cycling and concentrate at ternary points, causing changes in grain size and shape and destabilizing the Y₂O₃ stabilizer in YSZ. In addition, SiO₂ enhances the sintering process and reduces electrical conductivity, while highly concentrated oxygen ion vacancies in YSZ lead to oxygen transport and oxidation of the bond coating at the bond coating/TBC interface, causing delamination of the ceramic layer.

However, this issue was addressed by developing an oxidation-resistant bond coating using Al_2O_3 and mullite [20-21].

Pyrochlore-type $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ oxides are an innovative class of materials that have recently gained attention in the field of TBCs. In 2000, the first patent was obtained for their use in this application. These materials are rare earth metal zirconates with a pyrochlore structure, with Ln ranging from La to Gd. For Ho to Lu, the rhombohedral $\text{Ln}_3\text{Zr}_4\text{O}_{12}$ δ -phases form instead of pyrochlores. These phases are derived from the fluorite-type structure and have a superstructure relative to it. Some of the thermal barrier coatings based on pyrochlore-type phases are listed in Table 2, Table 3 [22-38].

Table 2

Advances Materials Based on Pyrochlore-Type Phases

Materials	Deposition/ production techniques	Thermal conductivity, $\text{W/m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Thermal expansion coefficient α , $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	Young's modulus E , GPa
$\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$		0.32–0.5 (300– 1300°C)	12.3–13	
$\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (Ln = Dy, Er, Yb)		1.3–1.9		
$(\text{La}, \text{Sm}, \text{Yb})_2(\text{Zr}, \text{Ce})_2\text{O}_{7.4}$; $(\text{Sr}_{0.1}\text{La}_{0.3}\text{Sm}_{0.5}\text{Yb}_{0.1})_2$ $(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.4})_2\text{O}_{7.3}$	Chemical	1.32–1.3 1.17–1.16	~11	10–11
$(\text{Nd}, \text{Yb})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	Chemical		10.93–10.62 (1250°C)	
$\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7(2.3\text{--}8.25\text{Y}_2\text{O}_3)$	Ceramic, EB-PVD	0.82–1.32	10–10.5	
$\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 3 \text{ wt.}\% \text{Y}_2\text{O}_3$	EB-PVD		9.15–9.27	153–146
$(\text{La}_{1-x}\text{Ybx})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	Chemical	1.3		
$\text{La}_2\text{T}_2\text{O}_7$ T = Ge; Ti; Sn; Zr; Hf	First principles calculations	1.14 1.17 1.00 1.03 0.87		258 253 245 237 228
Gradient YSZ/ $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ six-layer coating	APS	0.65–0.74 (1200°C)	8.18–9.836	203–182
$\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	EB-PVD			
$\text{Gd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ $(\text{Gd}_{0.9}\text{Ca}_{0.1})_2/\text{Ce}_2\text{O}_{6.9}$	Ceramic	3.1–2.0 2.5–1.8 (200–800 °C)		
$\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7/\text{YSZ}$	EB-PVD	Advantages: poor sinterability, close thermal expansion coefficients, and columnar structure; drawbacks: variable Ce valency		
$(\text{Sm}_{1-x}\text{Ybx})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	Chemical	~1.4 (800°C)		

continue tabl. 2

$(\text{Mg}_{0.7}\text{La}_{0.5-x}\text{Sm}_{0.5})_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_{1-x}$	Chemical	1.57 ($x = 0.2$)	11.3 (800°C)	
$\text{La}_2(\text{Zr}_x\text{Ce}_{1-x})_2\text{O}_7$	Ceramic	~1.5 (1000°C)		
$\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	Calculations using local density approximation and Hubbard energy	1.2		208
Pr		1.2		224
Nd		1.1		213
Sm		1.3		252
Eu		1.2		243
Gd		1.2		214
Specific weight, g/cm^3	Thermal stability	K_{Ic} , MPa $\text{m}^{0.5}$	Vickers hardness, GPa	
Dy = 6.89 Er = 7.29 Yb = 7.54				
			10	
	617 cycles (1100–25°C)	1.84–1.90	8.83–10.05	
5.292–4.928				
In the $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow m\text{-ZrO}_2 + \text{SmAlO}_3$ reaction, the coating is delaminated because of different thermal expansion coefficients of the existing phases				
7.295 6.586	3100 cycles; YSZ – 2400 cycles (1100–25°C)			

Table 3

Advances Materials Based on Zirconates/Cerates

Materials	Deposition/ production techniques	Thermal conductivity, $\text{W} / \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	APS	1.4–0.6 (800–25°C)
$\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7(\text{N}_2\text{Z})$ $\text{N}_2\text{Z}/\text{YSZ}$	APS	0.55–0.8 0.55–0.75 (500–1000°C)
$\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ $\text{MAl}_{11}\text{O}_{19}(\text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe})$	EB-PVD	
$(\text{La}, \text{Gd})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$	Chemical	

3. CMAS corrosion resistance of thermal barrier coatings

Modern TBCs can experience two types of corrosion: corrosion of the upper ceramic coating due to the reaction of V_2O_5 and Na_2SO_4 in the combustion products of low-quality fuel with CMAS glass absorbed into the engine, and oxidation of the blade material during operation. Even small amounts of SiO_2 (even 1 wt.%) in the YSZ coating can adversely affect its lifespan. ZrO_2 tends to collect at grain boundaries, which can destabilize nearby grains by dissolving Y_2O_3 . Silicon dioxide can increase the superplasticity of ZrO_2 polycrystals, leading to higher creep rates. However, silicates have lower oxygen conductivity than YSZ and can serve as an oxygen barrier to improve oxidation resistance. Low-quality fuels, such as petroleum coke, can contain Na and V, which form salts that interact with Y_2O_3 to form YVO_4 , leading to the failure of the coating. This failure occurs due to the washing away of the stabilizer from the coating, resulting in destructive phase transformation $T-ZrO_2 \rightleftharpoons M-ZrO_2$ because of a 3–5% volume increase [39].

The chemical reactions $Y_2O_3(\text{in YSZ})+3SO_3(\text{in } Na_2SO_4)\rightarrow Y_2(SO_4)_3(\text{in } Na_2SO_4)$ and $Y_2O_3(\text{in YSZ})+V_2O_5\rightarrow 2YVO_4$ have been studied to improve the high-temperature corrosion resistance of thermal barrier coatings (TBCs). Various methods have been proposed to enhance the stability of TBCs, including the use of stable stabilizers such as In_2O_3 , Sc_2O_3 , and CeO_2 , as well as deposition of a dense alumina layer on the YSZ surface or laser glazing and repeated melting to create a coating that prevents salt penetration.

Studies have shown that YSZ coatings have a longer life in a Na_2SO_4 environment but a shorter life in V_2O_5 . In contrast, $La_2Zr_2O_7$ coatings exhibit good resistance to hot corrosion by V_2O_5 but not by Na_2SO_4 , and both coatings show limited resistance in a mixture of Na_2SO_4 and V_2O_5 .

When a YSZ + $Gd_2Zr_2O_7$ coating is used, the molten $Na_2SO_4 + V_2O_5$ mixture reacts with the $Gd_2Zr_2O_7$ phase to form $GdVO_4$ and $M-ZrO_2$. Studies have shown that $Gd_2Zr_2O_7$ coatings demonstrate higher corrosion resistance at 1050°C than YSZ coatings, and the degradation rate depends on the thickness of the corrosion layer and the overall coating condition after high-temperature corrosion [40-41].

According to research, the reaction of P_2O_5 with YSZ coatings produced by APS results in the formation of zirconium pyrophosphate (ZrP_2O_7) at all experimental temperatures. Molten P_2O_5 reacts with solid YSZ to form ZrP_2O_7 , which reduces the amount of ZrO_2 in YSZ, promoting the cubic ZrO_2 phase of fluorite type. Dense layers of different compositions can be produced on the 8YSZ APS coatings after laser treatment. In contact with the $V_2O_5 + Na_2SO_4$ corrosive mixtures for 100 h at 1173 K, the 8YSZ TBC with an Al_2O_3 layer demonstrated good corrosion behavior at high temperatures, resulting in longer service life [42-43].

The degradation of 7YSZ TBCs due to the melting of silicate deposits, commonly known as CMAS attack, is a new issue for ceramic TBCs at higher operating temperatures. Researchers

have focused on preventing the CMAS effect on TBC stability. Two approaches have been explored: using a sealant or suppressing the wetting of the outer coating layer, and introducing a sacrificial layer or crystalline Al_2O_3 particles into the 7YSZ coating. The latter approach inhibits the propagation of the CMAS front using Al_2O_3 , but it is limited by stresses induced by different thermal expansion coefficients of the 7YSZ coating and the other phase (Al_2O_3) and an increase in the total thermal conductivity of the coatings. The formation of $\text{Y}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ appears to be optimum for suppressing the penetration of molten CMAS almost completely.

The microstructure of the reaction area for the YSZ coating and FTCMAS (Fe_2O_3 and TiO_2) and the compatibility of phases determined with additional sintering experiments show that the corrosion processes occur in two stages. The first stage involves a silicon-free, calcium source, most probably CaSO_4 from the vapor phase, which forms a thin CaZrO_3 layer on the upper coating. The second stage involves highly active Fe, Ti, and Si and is unfavorable for the formation of CaZrO_3 but stabilizes the kimzeyite phase with garnet structure [44].

4. The Design of the TBCs

There are two methods for preparing thermal barrier coatings (TBCs): suspension plasma spraying (SPS) and plasma spraying physical vapor deposition (PS-PVD). PS-PVD is a conventional method that uses low-pressure plasma spraying to create TBCs. The working chamber pressure in PS-PVD installations is typically between 50 and 200 Pa, which allows for the creation of plasma plumes with lengths exceeding 2 m and diameters of 200-400 mm. SPS is a newer technology that can produce thinner TBC layers than atmospheric plasma spraying (APS). In SPS, a suspension of submicron particles is introduced into a plasma stream through either an axial or radial injection. The particles are then melted and accelerated until they hit the surface, forming a TBC. Both PS-PVD and SPS produce TBCs with a columnar structure similar to that produced by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD), which improves the strain tolerance of the coatings. Additionally, TBCs produced using these methods have higher intracolumnar porosity, which reduces their thermal conductivity and makes them ideal for next-generation advanced TBCs. The comparison of main spraying technology, is presented in below Figure 1 [45].

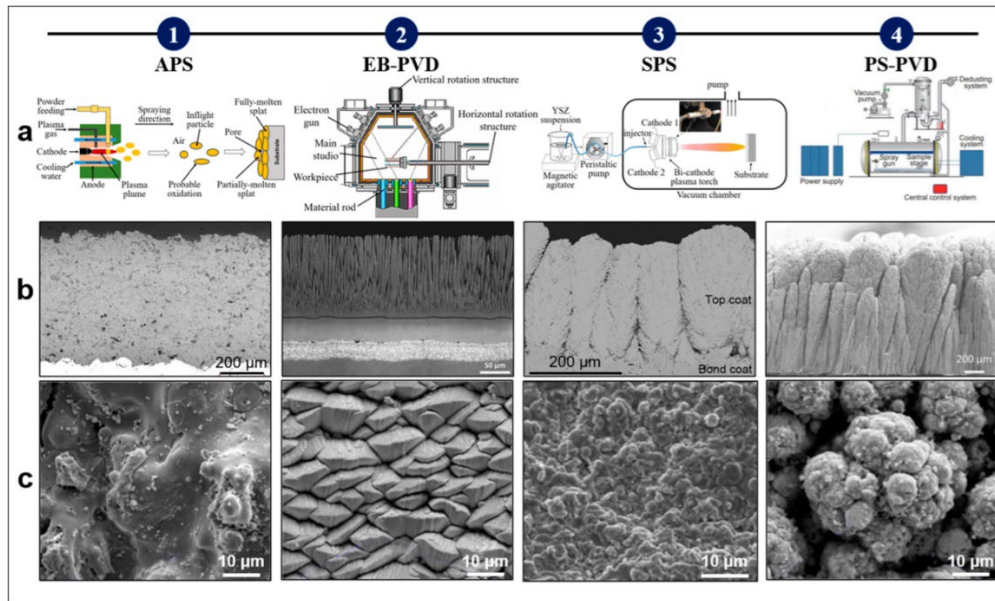


Fig. 1. Schematic diagram of the preparation process of TBCs: (a) equipment working principle, (b) cross-section, (c) surface SEM images (adapted from [45])

Rys. 1. Schemat ideowy procesu przygotowania TBC: (a) zasada działania sprzętu, (b) przekrój poprzeczny, (c) obrazy SEM powierzchni (na podstawie [45])

5. Conclusion

In conclusion, thermally sprayed barrier coatings (TBCs) have seen significant advancements in recent years. The use of advanced ceramic materials and coatings designed for specific applications has improved the durability and efficiency of TBCs. Emerging trends such as the use of suspension plasma spraying (SPS) and plasma spraying physical vapor deposition (PS-PVD) have shown promising results in producing TBCs with high intracolumnar porosity and reduced thermal conductivity. Additionally, research is being conducted on the handling of TBCs to prevent cracking and spalling during thermal cycling, as well as the development of coatings that can resist the damage caused by molten calcium-magnesium-aluminum-silicon oxide (CMAS) deposits. Overall, the future of TBCs is promising, with continued research and development leading to more advanced and durable coatings for high-temperature applications.

Advanced ceramic materials have become increasingly important in the development of thermally sprayed barrier coatings (TBCs) due to their excellent thermal and mechanical properties. Ceramic materials such as yttria-stabilized zirconia (YSZ), alumina (Al_2O_3), and chromia (Cr_2O_3) are commonly used in TBCs due to their high melting points, low thermal conductivity, and excellent resistance to thermal shock and oxidation.

In recent years, research has focused on developing advanced ceramic materials with improved performance and durability for use in TBCs. For example, research is being conducted on the development of nanostructured ceramic coatings, which have higher surface

areas and can improve the coating's mechanical and thermal properties. Additionally, new ceramic materials such as rare-earth-doped hafnia (HfO₂) and scandia (Sc₂O₃) are being studied for use in TBCs due to their higher thermal stability and resistance to thermal shock.

Moreover, the use of ceramic composites, such as ceramic-metal and ceramic-polymer composites, has shown promise in producing TBCs with improved mechanical properties and resistance to thermal shock. These composites combine the desirable properties of ceramics with those of metals or polymers, resulting in coatings with improved toughness and damage tolerance.

6. Acknowledgement

The author would like to express his deepest appreciation and gratitude to his supervisors, Professor Gregorz Moskal and Professor Albano Cavaleiro, for their invaluable guidance, mentorship, and support throughout the preparation of this review article.

References

1. C.U. Hardwicke and Y.-C. Lau, Advances in Thermal Spray Coatings for Gas Turbines and Energy Generation: A Review, *J. Therm. Spray Technol.*, 2013, 22(5), p. 564-576.
2. R.A. Miller, Current Status of Thermal Barrier Coatings- An Overview, *Surf. Coat. Technol.*, 1987, 30(1), p. 1-11.
3. R. Vaßen et al., Overview on Advanced Thermal Barrier Coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 2010, 205(4), p. 938-942.
4. E. Bakan and R. Vaßen, Ceramic Top Coats of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: Materials, Processes, and Properties, *J. Therm. Spray Technol.*, 2017, 26(6), p. 992-1010.
5. J.B. Wahl and K. Harris. Superalloys in Industrial Gas Turbines – An Overview. [In:] Presented at the 9th World Conference on Investment Casting, October 13-16, 1996, San Francisco, CA USA.
6. S. Bose, *High Temperature Coatings*. (2011): Elsevier Science.
7. S. Bose, J. DeMasiMarcin, Thermal Barrier Coating Experience in Gas Turbine Engines at Pratt & Whitney, *J. Therm. Spray Technol.*, 1997, 6(1), p. 99-104.
8. D.L. Poerschke, R.W. Jackson, C.G. Levi, Silicate Deposit Degradation of Engineered Coatings in Gas Turbines: Progress Toward Models and Materials Solutions. [In:] *Annual Review of Materials Research*, Vol. 47, D.R. Clarke, Editor. 2017. p. 297-330.

9. S. Raghavan et al., Ta₂O₅/Nb₂O₅ and Y₂O₃ Co-doped Zirconias for Thermal Barrier Coatings, *J. Am. Ceram. Soc.*, 2004, 87(3), p. 431-437.
10. J. Wang et al., Influence of Gd₂O₃ Substitution on Thermal and Mechanical Properties of ZrO₂-Ta₂O₅-Y₂O₃, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2021, 41(2), p. 1654-1663.
11. R. Taylor, J.R. Brandon, P. Morrell, Microstructure, Composition and Property Relationships of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 1992, 50(2), p. 141-149.
12. D. Zhu, R.A. Miller, Development of Advanced Low Conductivity Thermal Barrier Coatings, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2004, 1(1), p. 86-94.
13. D. Zhu et al., Furnace Cyclic Oxidation Behavior of Multicomponent Low Conductivity Thermal Barrier Coatings, *J. Therm. Spray Technol.*, 2004, 13(1), p. 84-92.
14. D. Chen et al., Microstructure, Thermal Characteristics, and Thermal Cycling Behavior of the Ternary Rare earth Oxides (La₂O₃, Gd₂O₃, and Yb₂O₃) co-doped YSZ Coatings, *Surface and Coatings Technol*, 2020, 403, p. 126387.
15. R. Vaßen et al., Zirconates as New Materials for Thermal Barrier Coatings, *J. Am. Ceram. Soc.*, 2000, 83(8), p. 2023-2028.
16. Lakiza S.M., et al. Thermal barrier coatings: current status, search, and analysis. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57 (2018): 82-113.
17. J. Wu, X. Wei, N.P. Padture, et al., Low-thermal-conductivity rare-earth zirconates for potential thermal barrier coating applications, *J. Am. Ceram. Soc.*, 85, 3031 (2002).
18. D. Zhu, R.A. Miller, Thermal conductivity and sintering behavior of advanced thermal barrier coatings, *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 23, 457-468 (2002).
19. Q.L. Li, X.Zh. Cui, S.Q. Li, et al., Synthesis and phase stability of scandia, gadolinia, and ytterbia codoped zirconia for thermal barrier coating application, *J. Therm. Spray Technol.*, 24, 136-143 (2015).
20. W. Ma, H. Dong, Ceramic thermal barrier coating materials, [in:] *Thermal Barrier Coatings* (2011), pp. 25-52.
21. P. Ramaswamy, S. Seetharamu, K.R. Varma, K.J. Rao, Thermal shock characteristics of plasma sprayed mullite coatings, *J. Therm. Spray Technol.*, 7, No. 4, 497-504 (1999).
22. S.M. Lakiza, et al., Thermal barrier coatings: current status, search, and analysis. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57 (2018): 82-113.
23. Zh. Xu, L. He, R. Mu et al., Thermal cycling behavior of YSZ and La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇ as double-ceramiclayer systems EB-PVD TBCs, *J. Alloys Compd.*, 525, 87-96 (2012).
24. H.-S. Zhang, X.-G. Chen, G. Li et al., Influence of Gd₂O₃ addition on thermophysical properties of La₂Ce₂O₇ ceramics for thermal barrier coatings, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 32, 3693-3700 (2012).
25. M. Zhao, X. Ren, W. Pan, Mechanical and thermal properties of simultaneously substituted pyrochlore compounds (Ca₂Nb₂O₇)_x(Gd₂Zr₂O₇)_{1-x}, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 35, 1055-1061 (2015).

26. A. Joulia, M. Vardelle, S. Rossignol, Synthesis and thermal stability of $\text{Re}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (Re = La, Gd) and $\text{La}_2(\text{Zr}_{1-x}\text{Ce}_x)_2\text{O}_{7-\delta}$ compounds under reducing and oxidant atmospheres for thermal barrier coatings, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 33, 2633-2644 (2013).
27. H. Zhang, L. Guo, Y. Ma, et al., Thermal cycling behavior of $(\text{Gd}_{0.9}\text{Yb}_{0.1})_2\text{Zr}_2\text{O}_7/8\text{YSZ}$ gradient thermal barrier coatings deposited on Hf-doped NiAl bond coat by EB-PVD, *Surf. Coat. Technol.*, 258, 950-955 (2014).
28. Y. Zhang, M. Xie, F. Zhou et al., Low thermal conductivity in $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ pyrochlore with a-site partially substituted with equimolar Yb_2O_3 and Er_2O_3 , *Ceram. Int.*, 40, 9151-9157 (2014).
29. L. Guo, H. Guo, H. Peng, Sh. Gong, Thermophysical properties of Yb_2O_3 doped $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ and thermal cycling durability of $(\text{Gd}_{0.9}\text{Yb}_{0.1})_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ thermal barrier coatings, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 34, 1255-1263 (2014).
30. Y. Zhou, H. Xiang, and Z. Feng, Theoretical investigation on mechanical and thermal properties of a promising thermal barrier material $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, *J. Mater. Sci. Technol.*, 30, No. 7, 631-638 (2014).
31. K. Matsumoto, Y. Itoh, and T. Kameda, EB-PVD process and thermal properties of hafnia-based thermal barrier coating, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 4, 153-158 (2003).
32. M. Zhao, X. Ren, J. Yang, W. Pan, Thermomechanical properties of ThO_2 -doped Y_2O_3 stabilized ZrO_2 for thermal barrier coatings, *Ceram. Int.*, 42, 501-508 (2016).
33. R. Gadow, M. Lischka, Lanthanum hexaaluminate – novel thermal barrier coatings for gas turbine applications, *Surf. Coat. Technol.*, 151-152, 392-399 (2002).
34. W. Ma, D.E. Mack, R. Vaßen, D. Stover, Perovskite-type strontium zirconate as a new material for thermal barrier coatings, *J. Am. Ceram. Soc.*, 91, No. 8, 2630-2635 (2008).
35. H. Liu, W. Zhao, Q. An, et al., Nanomechanical properties and microstructure of $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ plasma sprayed coatings, *Mat. Sci. Eng. A*, 518, 185-189 (2009).
36. A. Du, Ch. Wan, Zh. Qu, W. Pan, Thermal conductivity of monazite-type REPO_4 (RE = La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd), *J. Am. Ceram. Soc.*, 92, No. 11, 2687-2692 (2009).
37. X. Chen, Y. Zhang, X. Zhong et al., Thermal cycling behaviors of the plasma sprayed thermal barrier coatings of hexaluminates with magnetoplumbite structure, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 30, 1649-1657 (2010).
38. Z. Negahdari, M. Willert-Porada, F. Scherm, Thermal properties of homogenous lanthanum hexaaluminate/alumina composite ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 30, 3103-3109 (2010).
39. R.A. Miller, W.J. Brindley, J.G. Goedjen et al., The effect of silica on the cyclic life of a zirconia–yttria thermal barrier coating, [in:] C. C. Berndt and S. Sampath (eds.), *Proc. 7th Nat. Thermal Spray Conf. Thermal Spray in Industrial Applications* (Massachusetts, USA, June 1994), ASM International, Materials Park, Ohio, USA (1994), pp. 49-54.
40. I. Gurrappa, Thermal barrier coatings for hot corrosion resistance of CM 247 LC superalloy, *J. Mater. Sci. Lett.*, 17, No. 5, 1267-1269 (1998).

41. S. Y. Park, J. H. Kim, M. C. Kim, et al., "Microscopic observation of degradation behavior in yttria and ceria stabilized zirconia thermal barrier coatings under hot corrosion," *Surf. Coat. Technol.*, 190, No. 2-3, 357-366 (2005).
42. P. Mohan, B. Yuan, T. Patterson, et al., "Degradation of yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings by vanadium pentoxide, phosphorous pentoxide, and sodium sulfate," *J. Am. Ceram. Soc.*, 90, 3601-3607 (2007).
43. X.H. Zhong, Y.M. Wang, Z.H. Xu et al., Hot-corrosion behaviors of overlay-clad yttria-stabilized zirconia coatings in contact with vanadate – sulfate salts, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 30, 1401-1408 (2010).
44. W. Braue, P. Mechnich, Recession of an EB-PVD YSZ coated turbine blade by CaSO₄ and Fe, Ti-rich CMAS-type deposits, *J. Am. Ceram. Soc.*, 94, No. 12, 4483-4489 (2011).
45. Song, Jinbao et al., Multi-Scale Structural Design and Advanced Materials for Thermal Barrier Coatings with High Thermal Insulation: A Review. *Coatings* 13.2 (2023): 343.

AN OVERVIEW OF THE CURRENT STATUS AND EMERGING TRENDS IN THERMALLY SPRAYED BARRIER COATINGS

Abstract

Since more than 60 years ago, thermal barrier coatings have been used to gas turbines to preserve structural parts, raise operating temperatures, and improve efficiency. The best material for this use was found to be yttria-stabilized zirconia (YSZ) in the 1970s. The two primary deposition methods employed are atmospheric plasma spraying (APS) and electron beam physical vapor deposition (EB-PVD). Although the topic is not new, there are still continuous efforts to advance the technology, particularly in the area of thermal spray, with a focus on both materials and microstructural problems. The main advancements in these fields are summarized in this study, with a focus on thermal spray techniques. The effects of both materials and systems are demonstrated using the outcomes of burner rig testing for various systems. The article also offers a brief outlook on potential directions for future advancements.

Keywords: advanced materials, thermal barrier coatings, thermal spray machines, protection of materials

PRZEGLĄD AKTUALNEGO STANU I POJAWIAJĄCYCH SIĘ TRENDÓW W NATRYSKIWANYCH TERMICZNIE POWŁOKACH BARIEROWYCH

Streszczenie

Od ponad 60 lat na turbinach gazowych stosowane są powłoki termoizolacyjne, które chronią części konstrukcyjne, podnoszą temperaturę pracy i poprawiają wydajność. W latach 70. XX wieku stwierdzono, że najlepszym materiałem do tego zastosowania jest tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru (YSZ). Dwie podstawowe używane metody osadzania to atmosferyczne natryskiwanie plazmowe (APS) i fizyczne osadzanie z fazy gazowej wiązką elektronów (EB-PVD). Choć temat nie jest nowy, wciąż trwają wysiłki zmierzające do rozwoju technologii, przede wszystkim w dziedzinie natryskiwania termicznego, ze szczególnym uwzględnieniem problemów materiałowych i mikrostrukturalnych. W niniejszym opracowaniu podsumowano główne postępy w tych dziedzinach, z podkreśleniem technik natryskiwania termicznego. Efekty zarówno materiałów, jak i systemów przedstawiono na podstawie wyników testów na stanowiskach palnikowych dla różnych systemów. Artykuł zawiera również krótkie spojrzenie na potencjalne kierunki przyszłych postępów.

Słowa kluczowe: zaawansowane materiały, powłoki termoizolacyjne, maszyny do natryskiwania termicznego, ochrona materiałów

Dawid JANASIK¹

MULTIMODALNE SONDY DO OBRAZOWANIA REZONANSEM MAGNETYCZNYM ¹H/¹⁹F

1. Wstęp

Głównym celem nowoczesnych technik obrazowych i diagnostycznych jest wizualizacja procesów biologicznych na poziomie molekularnym i komórkowym [1-4]. Każda z tych technik ma swoje zalety i ograniczenia. Przykładowo, obrazowanie optyczne jest bardzo czułe, ale ma słabą penetrację tkanek, więc połączenie różnych technik obrazowania może pomóc w rozwiązaniu tych problemów i poprawić jakość uzyskanych obrazów. W dzisiejszych czasach konieczne jest często łączenie wielu zjawisk fizycznych w celu uzyskania bardziej wartościowych wyników diagnostycznych, co skłania do opracowania sond wielomodalnych kolejnych generacji [1, 3, 5-8]. Niemniej jednak integracja technik obrazowania w jednej cząsteczce jest trudna, a postęp w tej dziedzinie doprowadził do nieoczekiwanych rozwiązań [6, 9, 10].

Obrazowanie rezonansem magnetycznym (MRI) jest jedną z najpopularniejszych technik obrazowania stosowanych w szpitalach, umożliwiającą uzyskanie informacji, których nie można pozyskać w żaden inny sposób [11]. Najczęściej stosowany jest wariant ¹H MRI, który wychwytuje sygnał wszechobecnej w naszym ciele wody. Niemniej jednak możliwe jest również wykorzystanie innych jąder magnetycznych, takich jak fluor, który zyskuje coraz większą popularność ze względu na swoje właściwości. Jądra fluoru rzadko występują w tkankach miękkich, co rozwiązuje problem sygnału tła, charakterystycznego dla metody ¹H MRI. Fluor ma również szeroki zakres zmian przesunięcia chemicznego, a właściwości magnetyczne są podobne do jąder wodoru, co pozwala na użycie tego samego skanera zarówno dla ¹H, jak i ¹⁹F. Umożliwia to opracowanie tzw. inteligentnych sond molekularnych, które mogą wykrywać aktywność enzymów lub zmiany mikrośrodowiska przez zmianę intensywności sygnału bądź przesunięcia chemicznego [12-16].

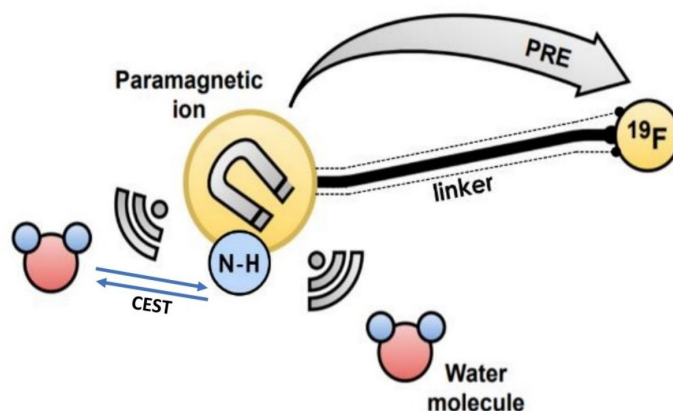
¹ Dawid.Janasik@polsl.pl, Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/rch5/>

W tej technice jako środek kontrastowy (CA) często stosowane są kompleksy makrocykliczne zawierające gadolin, co zwiększa czułość na sygnał i dokładność obrazów [11]. Jednak ich stosowanie jest ograniczone ze względu na możliwość poważnych skutków ubocznych, takich jak nefrogenne zwłóknienie układowe [17-18]. W celu poprawy czułości, zmniejszenia toksyczności i skrócenia czasu trwania skanów MRI badane są różne alternatywy [19].

Jednym z rozwiązań jest opracowanie nowych metod obrazowania, takich jak łączenie ^1H MRI z ^{19}F MRI. W przypadku obrazowania ^{19}F MRI stosowane jest tzw. hot spot imaging (obrazowanie punktowe), podczas gdy ^1H MRI umożliwia uzyskanie informacji anatomicznych oraz lokalizację sygnału ^{19}F . Tak więc połączenie tych technik pozwala na obrazowanie zjawisk biochemicznych na poziomie komórkowym (^{19}F) z dokładną strukturą anatomiczną badanego miejsca (^1H) [13].

W monografii opisano, w formie krótkiego przeglądu, budowę i wykorzystanie sond $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI do jednoczesnej detekcji sygnałów w obu modalnościach. W ostatniej dekadzie badano różne kompleksy makrocykliczne z grupami funkcyjnymi zawierającymi fluor jako potencjalne środki kontrastowe do ^{19}F MRI. W badaniach tych wykorzystano efekt wzmocnienia relaksacji paramagnetycznej (PRE) jonu paramagnetycznego w celu poprawy właściwości relaksacyjnych jąder ^{19}F i skrócenia wymaganego czasu akwizycji. Bimodalne sondy $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI można podzielić na dwie kategorie: a) kompleksy metali o niskiej masie cząsteczkowej z lantanowcami lub metalami przejściowymi, b) nanocząstki. Potencjalna reaktywność sond może być podstawą innej klasyfikacji. Spośród blisko 30 opisanych kontrastów $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI aż 12 można sklasyfikować jako responsywne. Ta kategoria obejmuje związki czułe na zmiany jonów Ca^{2+} , środowisko redoks oraz aktywność enzymów. Granice wykrywalności zazwyczaj wynoszą 1 mM zarówno dla jonu paramagnetycznego, jak i fluoru.

1.1. Kompleksy paramagnetyczne

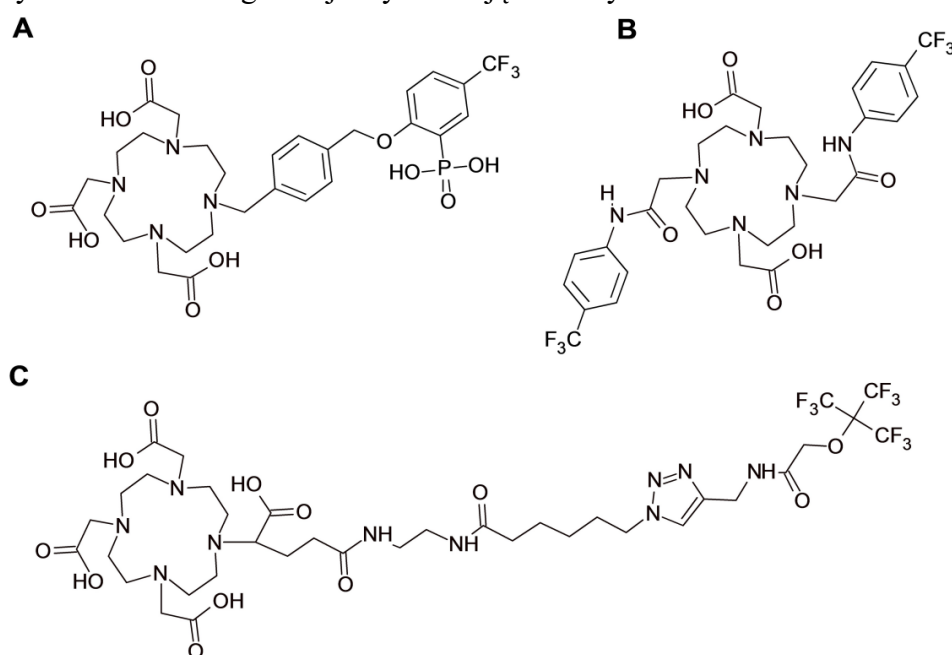


Rys. 1. Przykładowa budowa sond $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI z kompleksem paramagnetycznym

Fig. 1. Schematic representation of the bimodal $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI paramagnetic complex-type probe

Źródło: D. Janasik, T. Krawczyk, ^{19}F MRI Probes for Multimodal Imaging, Chem. – A Eur. J. (2021)

W przypadku kompleksów paramagnetycznych kontrast ^1H MRI uzyskuje się dzięki oddziaływaniu jonów paramagnetycznych z wodą tkankową. Sygnał ^{19}F jest osłabiany przez efekt PRE tego samego paramagnetyku, który działa na sąsiednie atomy fluoru (rys. 1). Sondy tego typu opierają się na kompleksach lantanowców (zazwyczaj stosuje się sole Gd(III) , ale także Dy(III) , Tb(III) i Yb(III))[20-22] z ligandami cyklenowymi i 3-9 równoważnymi atomami fluoru (rys. 2). Odległości metal-fluor mieszczą się w zakresie 4,5-10 Å [11, 12]. Każda sonda pozwala na krótki czas relaksacji poprzecznej jąder ^{19}F i wykazuje niski stosunek sygnału do szumu w ^{19}F NMR/MRI. Wadą takich rozwiązań jest konieczność stosowania gadolinu, który jako jedyny z lantanowców generuje wystarczająco dobry kontrast ^1H .



Rys. 2. Struktury ligandów wykorzystywane jako bimodalne środki kontrastowe $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI

Fig. 2. Structures of ligands effective as $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI bimodal agents

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [11, 20-22]

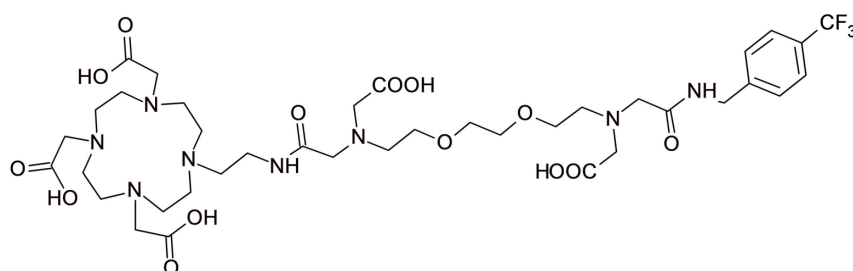
1.2. Responsywne kompleksy paramagnetyczne

W strukturze przedstawionej na rysunku 1 zauważalna jest możliwość zastosowania tzw. inteligentnego środka kontrastowego przez wybór odpowiedniego linkera, który pod wpływem określonego bodźca rozpadłby się lub zmienił konfigurację. Zazwyczaj prowadzi to do przesunięcia chemicznego lub zmiany właściwości relaksacyjnych fluoru, tak samo jak do zmiany interakcji z cząsteczkami wody [13].

1.2.1. Wykrywanie jonów wapnia

Jednym z czynników aktywujących kontrast może być stężenie jonów Ca^{2+} , co umożliwia diagnostykę wielu chorób [23]. Jednym przykładem środka reagującego na zmiany stężenia

Ca^{2+} jest makrocykliczny kompleks lantanowca z łańcuchem polieterowym zakończonym ugrupowaniem CF_3 [24]. Zasada wykrywania jonów Ca^{2+} opiera się na selektywnym kompleksowaniu jonów, co prowadzi do zmiany konformacyjnej łańcucha eterowego i zmniejszenia odległości między ugrupowaniem CF_3 a centrum paramagnetycznym (rys. 3). Koordynacja jonów wapnia jednocześnie zmienia hydratację lantanowca, co prowadzi do wzrostu kontrastu ^1H . Badania były ograniczone do eksperymentów *in vitro* ze stężeniami czynników 1,2-5 mM. Ponieważ stechiometryczna ilość wapnia jest niezbędna do koordynacji, czułość była ograniczona. Istotne zmiany kontrastu były widoczne przy stężeniach Ca^{2+} na poziomie jednej trzeciej ilości kompleksów Gd^{3+} lub Dy^{3+} [24]. Dalsza poprawa wydajności może być potencjalnie osiągnięta dzięki określonym sekwencjom akwizycji oraz postępom w sprzęcie ^{19}F MRI.



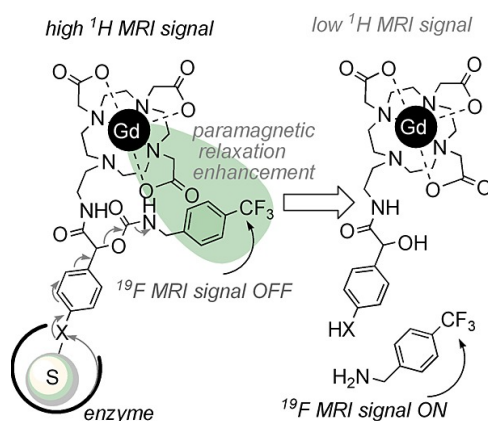
Rys. 3. Ligand czuły na jony Ca^{2+} . Wychwyt Ca^{2+} przez ramiona karboksylowe zmniejsza dystans pomiędzy grupą CF_3 a makrocyklem

Fig. 3. Ca^{2+} responsive ligand. Complexation of Ca^{2+} by the functionalities in the side arm increases the distance between the CF_3 group and the macrocycle

Źródło: opracowanie własne na podstawie [24]

1.2.2. Ocena aktywności enzymatycznej

Kolejną gałęzią responsywnych sond jest wykrywanie aktywności enzymatycznej, na przykład β -galaktozydaz, które są ważnymi enzymami w ludzkim ciele. Odpowiadają za rozpad glikozydowego wiązania, co czyni je niezbędnym elementem pozyskiwania energii. Ponadto gen lacZ kodujący β -galaktozydazę jest często używany jako reporter w biologii molekularnej, a liczne metody wykrywania aktywności tego enzymu pozwalają na uzyskanie informacji o różnych procesach biochemicznych [25]. Niedawno opracowane metody wykorzystujące ^{19}F MRI jako hot-spot umożliwiły zastosowanie wielu kontrastów wrażliwych na enzymy, w tym dualnych $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ środków specyficznych dla β -galaktozydazy. Sondy te działają na zasadzie hydrolizy β -D-galaktopiranozydów, co prowadzi do uwolnienia aglikonu o odmiennych właściwościach magnetycznych [26-28]. Przykładowo aldehydy fluorosalicylowe i arylohydrazony β -D-galaktopiranozydu to szeroko badane związki z tej klasy. Mechanizm działania tych środków opiera się na aktywacji sygnałów ^1H i ^{19}F , przy czym zmiana przesunięcia chemicznego fluoru między wolnym a związanym wynosi 6-8 ppm [26-29].



Rys. 4. Struktura i mechanizm działania środka kontrastowego MRI czułego na aktywność enzymatyczną

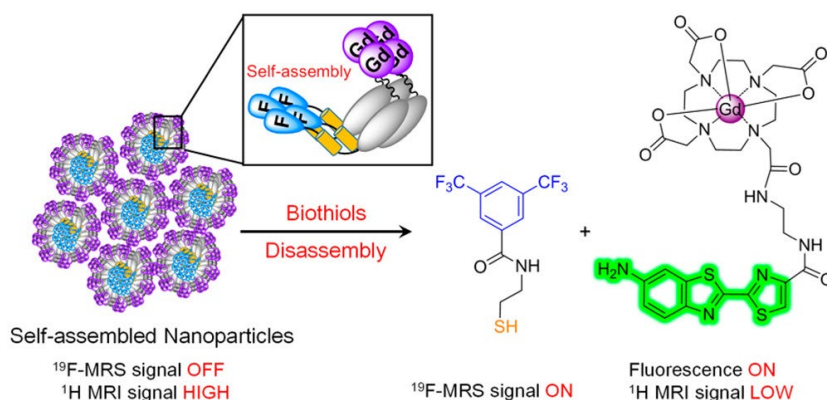
Fig. 4. The structure and mechanism of an enzyme-responsive MRI contrast agent

Źródło: A. Keliris, I. Mamedov, G.E. Hagberg, N.K. Logothetis, K. Scheffler, J. Engelmann, A smart ^{19}F and ^1H MRI probe with self-immolative linker as a versatile tool for detection of enzymes, *Contrast Media Mol. Imaging*. 7 (2012) 478-483

1.2.3. Sondy wrażliwe na reakcje redoks

Glutation (GSH) to naturalny tiol o ważnym działaniu przeciwutleniającym. Podwyższony poziom GSH występuje w wielu guzach, co może pomóc w diagnostyce procesów patologicznych [30]. W obrazowaniu środowiska utleniająco-redukującego $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ wykorzystuje się głównie sondy, które pod wpływem reakcji redoks rozpadają się i uwalniają sygnał magnetyczny. Rzadziej stosuje się sondy, które działają na zasadzie zmiany stopnia utlenienia jonu paramagnetycznego w kompleksie.

Przykładem sondy pierwszego typu może być układ chelatu Gd(III) z łącznikiem disiarczkowym (rys. 5). Budowa sondy pozwala na samoorganizację się nanocząstek, co skutecznie wygasza sygnały ^1H i ^{19}F NMR. Podczas kontaktu z białkiem łączniki ulegają rozpadowi i zmieniający jest sygnał NMR, gdzie dla ^1H maleje on o 68%, a dla ^{19}F wzrasta nawet o 70 razy. Przeprowadzono także badania *in vivo* guza u myszy przy stężeniu tak niewielkim jak $500\ \mu\text{M}$ [31, 32]. W dalszych badaniach projekt sondy został dodatkowo wzbogacony przez PEGylovaną β -Gal do celowania w wątrobę, co pozwoliło na nieinwazyjne obrazowanie stanu zapalnego i postępów leczenia u myszy. Wymagane stężenia sondy i jakość obrazów były podobne do pierwotnych wyników ($700\ \mu\text{M}$) [33].

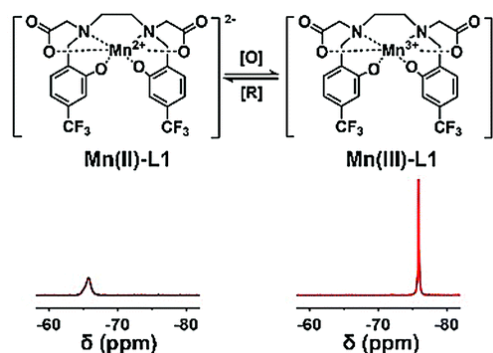


Rys. 5. Mechanizm działania i budowa trimodalnej sondy fluorescencji/ ^{19}F / ^1H MRI w odpowiedzi na środowisko redukujące

Fig. 5. Mechanism of activation and the structure of a trimodal fluorescence/ ^{19}F -MRS/ ^1H -MRI probe response to a reducing environment

Źródło: M. Zheng, Y. Wang, H. Shi, Y. Hu, L. Feng, Z. Luo, M. Zhou, J. He, Z. Zhou, Y. Zhang, D. Ye, Redox-Mediated Disassembly to Build Activatable Trimodal Probe for Molecular Imaging of Biothiols, ACS Nano. 10 (2016) 10075-10085

Drugi typ sond redoks uzyskano, kompleksując ligand N, N'-bis (2-hydroksy-4-trifluorometylbzyl)-etylenodiaminy-N, N'-kwasu octowego z jonami manganu (rys. 6). Metal podczas zmiany stopnia utlenienia zmienia także właściwości paramagnetyczne. Z tego też powodu kompleks wykazuje bardzo dużą zmianę (około 5-krotnie) intensywności sygnału ^{19}F po utlenieniu (H_2O_2) centralnego jonu manganu [34].



Rys. 6. Kompleks Mn(II)/(III) jako środek kontrastowy czuły na środowisko redoks. Poniżej przedstawiono sygnały ^{19}F NMR dla każdej z form

Fig. 6. Mn(II)/(III) complex as redox-sensitive contrast agent with respective ^{19}F NMR spectra

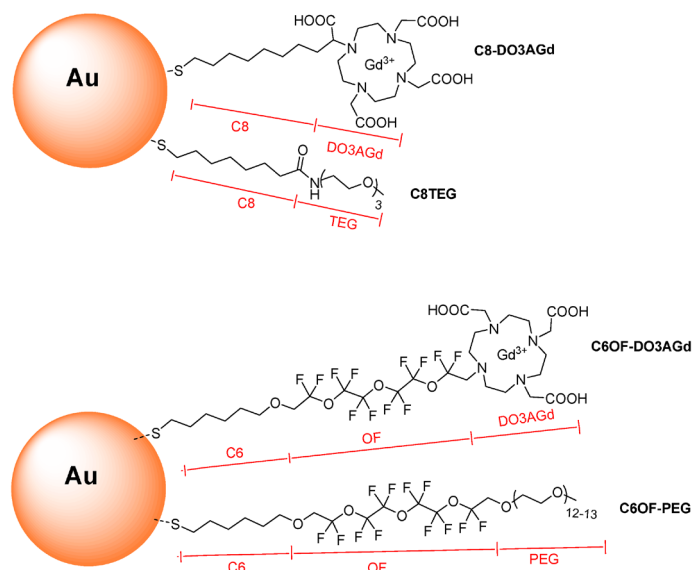
Źródło: H. Zhou, M. Qi, J. Shao, F. Wang, X. Li, Z. Zhou, S. Yang, H. Yang, Manganese oxide/Metal-Organic Frameworks-Based Nanocomposites for Tumor Micro-environment Sensitive $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ Dual-mode Magnetic Resonance Imaging in Vivo, J. Organomet. Chem. 933 (2021) 121652

2. Nanocząstki

Systemy o wymiarach nano mogą być wykorzystane jako sondy bimodalne $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ tylko jeśli posiadają właściwości paramagnetyczne lub superparamagnetyczne (głównie związki żelazowe, manganowe czy palladowe). Bez tego nie ma możliwości poprawy relaksacji cząsteczek wody, a co za tym idzie uzyskania kontrastu. Gdy cząsteczka sama w sobie nie jest paramagnetyczna, można ją zmodyfikować tlenkami metali lub przyczepić kompleksy paramagnetyczne do powierzchni. Tak samo można wprowadzić atomy fluoru, a alternatywnie można to wszystko zamknąć we wnętrzu i uzyskać kapsułkowany środek kontrastowy.

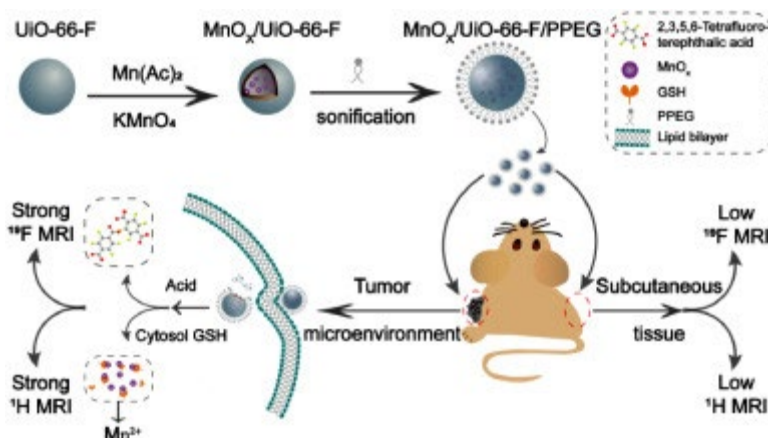
Sondy tego typu obejmują różnorodne struktury, takie jak porowate nanocząstki krzemionki [35], cząstki metali (Au i Pd) [36, 37], kapsułkowane perfluorowęglowodory [38], nanocząsteczki lipidowe [39, 40], funkcjonalizowane polisacharydy [41, 42] i metaloorganiczne nanokompozyty [34, 43]. Wszystkie wykazują pewne cechy wspólne, takie jak niska zawartość fluoru i metali paramagnetycznych. Średnica u większości sond wynosi 40-200 nm, z wyjątkiem nanocząstek złota (1,5 nm). Istotną zaletą nanocząstek jest ich łatwe usuwanie z organizmu oraz zdolność do celowania w nowotwory.

Relaksacyjność atomów fluoru w układach nano znacznie różni się od właściwości substancji małowcząsteczkowych. Objawia się to zwiększonym czasem korelacji rotacyjnej, która uzależniona jest od wielkości cząsteczki. Dodatkowo duże układy umożliwiają bardziej elastyczne projektowanie i regulację stosunku ilościowego metalu do fluoru oraz odległości pomiędzy nimi. Przykładowo, problem ten został omówiony dla nanocząstek lipidowych z uwięzionym w środku PFC (konkretnie fluorowanym eterem koronowym). Powierzchnia cząstek jest pokryta kompleksem Gd(III), a stosunek F/Gd wynosi 550 [39]. Podobny pomysł został przedstawiony z nanocząstkami złota Au o średnicy 2 nm, na których umocowano perfluoropolieter zakończony chelatem Gd(III) lub łańcuchem PEG (rys. 7) [36].



Rys. 7. Nanocząsteczki złota modyfikowane perfluoropolietierem z kompleksem gadolinu
 Fig. 7. Au nanoparticles grafted with a perfluoropolyether terminated with a Gd(III) chelate
 Źródło: M. Şologan, F. Padelli, I. Giachetti, D. Aquino, M. Boccalon, G. Adami, P. Pengo, L. Pasquato, Functionalized Gold Nanoparticles as Contrast Agents for Proton and Dual Proton/Fluorine MRI, *Nanomaterials*. 9 (2019) 879

Można także wyeliminować kompleksy paramagnetyczne, stosując w tym celu związki żelaza lub manganu. Działają one jako źródło paramagnetyzmu i w dużych ilościach mogą konkurować z gadolinem. Na przykładzie nanocząsteczek cyrkonu domieszkowanego tlenkami manganu zaprojektowano środek kontrastowy wrażliwy na zmiany pH. Jest to ważne przy diagnostyce nowotworowej, gdzie pH zdrowej tkanki wynosi 7, a tkanki patologicznej $< 6,5$. Działanie sondy opiera się na uwolnieniu cząsteczek fluoru w niskim pH (wzmocnieniu sygnału ^{19}F) i na reakcji redoks tlenków manganu w obecności GSH (kontrast ^1H) [34].



Rys. 8. Synteza i działanie bimodalnej sondy $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI do obrazowania guzów in vivo. Odpowiedź kontrastu jest aktywowana obecnością GSH i niskim pH
 Fig. 8. Synthesis of a bimodal $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI platform for in vivo tumor imaging. The response is governed by the presence of GSH and low pH
 Źródło: H. Zhou, M. Qi, J. Shao, F. Wang, X. Li, Z. Zhou, S. Yang, H. Yang, Manganese oxide/Metal-Organic Frameworks-Based Nanocomposites for Tumor Micro-environment Sensitive $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ Dual-mode Magnetic Resonance Imaging in Vivo, *J. Organomet. Chem.* 933 (2021) 121652

3. Podsumowanie

Badania na temat ^1H i ^{19}F MRI stale się rozwijają, a połączenie tych dwóch technik obrazowania może przynieść wiele korzyści. Dzięki temu możliwe będzie uzyskanie anatomicznych informacji 3D przy jednoczesnym monitorowaniu zjawisk biochemicznych na poziomie komórkowym. Może to przyczynić się do poprawy diagnostyki i leczenia różnych schorzeń, w tym neurologicznych i onkologicznych. Ponadto obiecujące jest także monitorowanie postępu terapii za pomocą metod *in vivo* i *ex vivo*.

Bibliografia

1. R. Weissleder, M.J. Pittet, Imaging in the era of molecular oncology, *Nature*. 452 (2008) 580-589. <https://doi.org/10.1038/nature06917>.
2. H. Kobayashi, M.R. Longmire, M. Ogawa, P.L. Choyke, Rational chemical design of the next generation of molecular imaging probes based on physics and biology: mixing modalities, colors and signals, *Chem. Soc. Rev.* 40 (2011) 4626. <https://doi.org/10.1039/c1cs15077d>.
3. L. Martí-Bonmatí, R. Sopena, P. Bartumeus, P. Sopena, Multimodality imaging techniques, *Contrast Media Mol. Imaging*. 5 (2010) 180-189. <https://doi.org/10.1002/cmimi.393>.
4. R. Kumar, P. Gautam, Ritambhara, S. Vijayaraghavalu, G.C. Shukla, M. Kumar, Imaging and future perspectives for diagnosis of complex diseases, *Clin. Epidemiol. Glob. Heal.* 8 (2020) 1119-1120. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2020.04.001>.
5. N. Cakić, T. Savić, J. Stricker-Shaver, V. Truffault, C. Platas-Iglesias, C. Mirkes, R. Pohmann, K. Scheffler, G. Angelovski, Paramagnetic lanthanide chelates for multicontrast MRI, *Chem. Commun.* 52 (2016) 9224-9227. <https://doi.org/10.1039/c6cc04011j>.
6. J. Zhao, J. Chen, S. Ma, Q. Liu, L. Huang, X. Chen, K. Lou, W. Wang, Recent developments in multimodality fluorescence imaging probes, *Acta Pharm. Sin. B.* 8 (2018) 320-338. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2018.03.010>.
7. D.-E.E. Lee, H. Koo, I.-C.C. Sun, J.H. Ryu, K. Kim, I.C. Kwon, Multifunctional nanoparticles for multimodal imaging and theragnosis, *Chem. Soc. Rev.* 41 (2012) 2656-2672. <https://doi.org/10.1039/C2CS15261D>.
8. L.E. Jennings, N.J. Long, 'Two is better than one' – probes for dual-modality molecular imaging, *Chem. Commun.* (2009) 3511. <https://doi.org/10.1039/b821903f>.
9. S.R. Cherry, Multimodality *in vivo* imaging system: Twice the Power or Double the Trouble?, *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 8 (2006) 35-62. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.8.061505.095728>.

10. A. Louie, Multimodality Imaging Probes: Design and Challenges, *Chem. Rev.* 110 (2010) 3146-3195. <https://doi.org/10.1021/cr9003538>.
11. R. Pujales-Paradela, T. Savić, D. Esteban-Gómez, G. Angelovski, F. Carniato, M. Botta, C. Platas-Iglesias, Gadolinium(III)-Based Dual $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ Magnetic Resonance Imaging Probes, *Chem. – A Eur. J.* 25 (2019) 4782-4792. <https://doi.org/10.1002/chem.201806192>.
12. D. Janasik, P. Imielska, T. Krawczyk, Tuning the pH of Activation of Fluorinated Hydrazone-Based Switches – A Pathway to Versatile ^{19}F Magnetic Resonance Imaging Contrast Agents, *ACS Sensors.* (2023). <https://doi.org/10.1021/acssensors.2c02251>.
13. D. Janasik, T. Krawczyk, ^{19}F MRI Probes for Multimodal Imaging, *Chem. – A Eur. J.* (2021). <https://doi.org/10.1002/chem.202102556>.
14. M. Zalewski, D. Janasik, A. Wierzbicka, T. Krawczyk, Design Principles of Responsive Relaxometric ^{19}F Contrast Agents: Evaluation from the Point of View of Relaxation Theory and Experimental Data, *Inorg. Chem.* 61 (2022) 19524-19542. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c03451>.
15. M. Zalewski, D. Janasik, A. Kapała, M. Minoshima, F. Sugihara, W. Raj, J. Pietrasik, K. Kikuchi, T. Krawczyk, pH-Sensitive Polymethacrylates as Potential Contrast Agents in ^{19}F MRI, *Macromol. Chem. Phys.* (2022) 2200027. <https://doi.org/10.1002/macp.202200027>.
16. D. Janasik, K. Jasiński, W.P. Węglarz, I. Nemeč, P. Jewula, T. Krawczyk, Ratiometric pH-Responsive ^{19}F Magnetic Resonance Imaging Contrast Agents Based on Hydrazone Switches, *Anal. Chem.* 94 (2022) 3427-3431. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c04978>.
17. L. Caschera, A. Lazzara, L. Piergallini, D. Ricci, B. Tuscano, A. Vanzulli, Contrast agents in diagnostic imaging: Present and future, *Pharmacol. Res.* 110 (2016) 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2016.04.023>.
18. T. Grobner, F.C. Prischl, Gadolinium and nephrogenic systemic fibrosis, *Kidney Int.* 72 (2007) 260-264. <https://doi.org/10.1038/sj.ki.5002338>.
19. J.R. Morrow, É. Tóth, Next-Generation Magnetic Resonance Imaging Contrast Agents, *Inorg. Chem.* 56 (2017) 6029-6034. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b01277>.
20. E. Hequet, C. Henoumont, V. Djouana Kenfack, V. Lemaur, R. Lazzaroni, S. Boutry, L. Vander Elst, R.N. Muller, S. Laurent, Design, Characterization and Molecular Modeling of New Fluorinated Paramagnetic Contrast Agents for Dual $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI, *Magnetochemistry.* 6 (2020) 8. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6010008>.
21. E. Hequet, C. Henoumont, R.N. Muller, S. Laurent, Fluorinated MRI contrast agents and their versatile applications in the biomedical field, *Future Med. Chem.* 11 (2019) 1157-1175. <https://doi.org/10.4155/fmc-2018-0463>.
22. M.P. Placidi, M. Botta, F.K. Kálmán, G.E. Hagberg, Z. Baranyai, A. Krenzer, A.K. Rogerson, I. Tóth, N.K. Logothetis, G. Angelovski, I. Tóth, N.K. Logothetis, G. Angelovski, Aryl-Phosphonate Lanthanide Complexes and Their Fluorinated Derivatives: Investigation of Their

- Unusual Relaxometric Behavior and Potential Application as Dual Frequency $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MRI Probes, *Chem. – A Eur. J.* 19 (2013) 11644-11660. <https://doi.org/10.1002/chem.201300763>.
23. I.R.R. Reid, G.D.D. Gamble, M.J.J. Bolland, Circulating calcium concentrations, vascular disease and mortality: a systematic review, *J. Intern. Med.* 279 (2016) 524-540. <https://doi.org/10.1111/joim.12464>.
 24. P. Kadjane, C. Platas-Iglesias, P. Boehm-Sturm, V. Truffault, G.E. Hagberg, M. Hoehn, N.K. Logothetis, G. Angelovski, Dual-Frequency Calcium-Responsive MRI Agents, *Chem. – A Eur. J.* 20 (2014) 7351-7362. <https://doi.org/10.1002/chem.201400159>.
 25. D.H. Juers, B.W. Matthews, R.E. Huber, LacZ β -galactosidase: Structure and function of an enzyme of historical and molecular biological importance, *Protein Sci.* 21 (2012) 1792-1807. <https://doi.org/10.1002/pro.2165>.
 26. V.D. Kodibagkar, J. Yu, L. Liu, H.P. Hetherington, R.P. Mason, Imaging β -galactosidase activity using ^{19}F chemical shift imaging of LacZ gene-reporter molecule 2-fluoro-4-nitrophenol- β -d-galactopyranoside, *Magn. Reson. Imaging.* 24 (2006) 959-962. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2006.04.003>.
 27. J.-X. Yu, V.D. Kodibagkar, R.R. Hallac, L. Liu, R.P. Mason, Dual $^{19}\text{F}/^1\text{H}$ MR Gene Reporter Molecules for in Vivo Detection of β -Galactosidase, *Bioconjug. Chem.* 23 (2012) 596-603. <https://doi.org/10.1021/bc200647q>.
 28. J.-X.X. Yu, V.D. Kodibagkar, L. Liu, Z. Zhang, J. Magnusson, Y. Liu, L. Liu, J. Magnusson, Y. Liu, ^{19}F -MRS/ ^1H -MRI dual-function probe for detection of β -galactosidase activity, *Chem. Sci.* 4 (2013) 2132. <https://doi.org/10.1039/c3sc21099e>.
 29. A. Keliris, I. Mamedov, G.E. Hagberg, N.K. Logothetis, K. Scheffler, J. Engelmann, A smart ^{19}F and ^1H MRI probe with self-immolative linker as a versatile tool for detection of enzymes, *Contrast Media Mol. Imaging.* 7 (2012) 478-483. <https://doi.org/10.1002/cmmi.1470>.
 30. L. Kennedy, J.K. Sandhu, M.-E. Harper, M. Cuperlovic-Culf, Role of Glutathione in Cancer: From Mechanisms to Therapies, *Biomolecules.* 10 (2020) 1429. <https://doi.org/10.3390/biom10101429>.
 31. S. Bo, C. Song, Y. Li, W. Yu, S. Chen, X. Zhou, Z. Yang, X. Zheng, Z.-X.X. Jiang, Design and Synthesis of Fluorinated Amphiphile as ^{19}F MRI/Fluorescence Dual-Imaging Agent by Tuning the Self-Assembly, *J. Org. Chem.* 80 (2015) 6360-6366. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.5b00810>.
 32. M. Zheng, Y. Wang, H. Shi, Y. Hu, L. Feng, Z. Luo, M. Zhou, J. He, Z. Zhou, Y. Zhang, D. Ye, Redox-Mediated Disassembly to Build Activatable Trimodal Probe for Molecular Imaging of Biothiols, *ACS Nano.* 10 (2016) 10075-10085. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05030>.
 33. Y. Hu, Y. Wang, X. Wen, Y. Pan, X. Cheng, R. An, G. Gao, H.-Y. Chen, D. Ye, Responsive Trimodal Probes for In Vivo Imaging of Liver Inflammation by Coassembly and GSH-Driven Disassembly, *Research.* 2020 (2020) 1-13. <https://doi.org/10.34133/2020/4087069>.

34. H. Zhou, M. Qi, J. Shao, F. Wang, X. Li, Z. Zhou, S. Yang, H. Yang, Manganese oxide/Metal-Organic Frameworks-Based Nanocomposites for Tumor Micro-environment Sensitive $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ Dual-mode Magnetic Resonance Imaging in Vivo, *J. Organomet. Chem.* 933 (2021) 121652. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2020.121652>.
35. M. Bouchoucha, R.B. van Heeswijk, Y. Gossuin, F. Kleitz, M.-A.A. Fortin, Fluorinated Mesoporous Silica Nanoparticles for Binuclear Probes in ^1H and ^{19}F Magnetic Resonance Imaging, *Langmuir*. 33 (2017) 10531-10542. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b01792>.
36. M. Şologan, F. Padelli, I. Giachetti, D. Aquino, M. Boccalon, G. Adami, P. Pengo, L. Pasquato, Functionalized Gold Nanoparticles as Contrast Agents for Proton and Dual Proton/Fluorine MRI, *Nanomaterials*. 9 (2019) 879. <https://doi.org/10.3390/nano9060879>.
37. X. Tang, X. Gong, J. Ming, D. Chen, H. Lin, J. Gao, Fluorinated Gadolinium Chelate-Grafted Nanoconjugates for Contrast-Enhanced T₁-Weighted ^1H and pH-Activatable ^{19}F Dual-Modal MRI, *Anal. Chem.* 92 (2020) 16293-16300. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c04296>.
38. H. Vu-Quang, T.-Q. Nguyen, M.S. Vinding, Synthesis of Poly (Styrene Sulfonate) Coated Gd³⁺ Poly (Lactide-Co-Glycolic Acid) Perfluoro Bromide Nanoparticles for Stem Cell Monitoring Using Magnetic Resonance Imaging, *Rev. Chim.* 71 (2020) 77-86. <https://doi.org/10.37358/RC.20.9.8319>.
39. G. Gambino, T. Gambino, G. Angelovski, Combination of bioresponsive chelates and perfluorinated lipid nanoparticles enables in vivo MRI probe quantification, *Chem. Commun.* 56 (2020) 9433-9436. <https://doi.org/10.1039/D0CC04416D>.
40. A. de Vries, R. Moonen, M. Yildirim, S. Langereis, R. Lamerichs, J.A. Pikkemaat, S. Baroni, E. Terreno, K. Nicolay, G.J. Strijkers, H. Gröll, Relaxometric studies of gadolinium-functionalized perfluorocarbon nanoparticles for MR imaging, *Contrast Media Mol. Imaging*. 9 (2014) 83-91. <https://doi.org/10.1002/cmml.1541>.
41. E. De Luca, P. Harvey, K.H. Chalmers, A. Mishra, P.K. Senanayake, J.I. Wilson, M. Botta, M. Fekete, A.M. Blamire, D. Parker, Characterisation and evaluation of paramagnetic fluorine labelled glycol chitosan conjugates for ^{19}F and ^1H magnetic resonance imaging, *JBIC J. Biol. Inorg. Chem.* 19 (2014) 215-227. <https://doi.org/10.1007/s00775-013-1028-y>.
42. E. Gianolio, R. Napolitano, F. Fedeli, F. Arena, S. Aime, Poly- β -cyclodextrin based platform for pH mapping via a ratiometric $^{19}\text{F}/^1\text{H}$ MRI method, *Chem. Commun.* (2009) 6044. <https://doi.org/10.1039/b914540k>.
43. C. Zhang, L. Li, F.Y. Han, X. Yu, X. Tan, C. Fu, Z.P. Xu, A.K. Whittaker, Integrating Fluorinated Polymer and Manganese-Layered Double Hydroxide Nanoparticles as pH-activated ^{19}F MRI Agents for Specific and Sensitive Detection of Breast Cancer, *Small*. 15 (2019) 1-7. <https://doi.org/10.1002/sml.201902309>.

MULTIMODALNE SONDY DO OBRAZOWANIA REZONANSEM MAGNETYCZNYM $^1\text{H}/^{19}\text{F}$

Streszczenie

Obrazowanie rezonansem magnetycznym (MRI) jest jedną z najpopularniejszych metod obrazowania, zdolna uzyskać znakomity kontrast tkanek miękkich. W tym przeglądzie przedstawiono najnowsze doniesienia z zakresu bimodalnych sond fluorowego i wodorowego rezonansu magnetycznego ($^{19}\text{F}/^1\text{H}$ MRI). W każdym przypadku multimodalne sondy łączą zalety obu technik obrazowania, eliminując ich wady i ograniczenia. Podczas dyskusji projektowania bimodalnych sond $^{19}\text{F}/^1\text{H}$ MRI skupiono się na opisie ich struktury, właściwości fizykochemicznych, biokompatybilności oraz na jakości uzyskanych obrazów.

Słowa kluczowe: fluor, obrazowanie rezonansem magnetycznym, sondy bimodalne

MULTIMODAL PROBES FOR $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ MAGNETIC RESONANCE IMAGING

Abstract

Magnetic Resonance Imaging (MRI) is one of the most popular imaging methods capable of obtaining excellent soft tissue contrast. This review presents the latest reports on bimodal fluorine and proton magnetic resonance probes ($^{19}\text{F}/^1\text{H}$ MRI). In each case, multimodal probes combine the advantages of both imaging techniques, eliminating their disadvantages and limitations. During the discussion of designing bimodal $^{19}\text{F}/^1\text{H}$ MRI probes, the focus was on describing their structure, physicochemical properties, biocompatibility, and the quality of the obtained images.

Keywords: fluorine, magnetic resonance imaging, bimodal probes

Magdalena JARZYŃSKA¹

MAPOWANIE PROCESÓW KOMERCJALIZACJI INNOWACJI W WYBRANEJ BRANŻY

1. Wstęp

Zakłady pracy tworzą wiele nowych rozwiązań projektowych i procesowych, zasadniczym problemem pozostaje kwestia wprowadzenia ich na rynek, czyli tzw. komercjalizacja. Wprowadzenie nowych produktów czy usług na rynek wiąże się z dokładnie przemyślaną strategią ich wdrożenia. Pierwotną motywacją do produkcji i komercjalizacji są oczekiwania klientów, a zaspokojenie potrzeb klienta oznacza dla przedsiębiorstwa zrealizowaną sprzedaż oraz osiągnięcie zysku. Współcześni menadżerowie muszą elastycznie reagować na zmiany rynku, sytuację gospodarczą na świecie oraz rosnące wymagania klienta wobec ostatecznego produktu i/lub usługi. Z myślą o zwiększeniu efektywności i optymalizacji, a co za tym idzie – zwiększeniu konkurencyjności na rynku, przedsiębiorstwa produkcyjne sięgają po sprawdzone metody zarządzania, w tym lean management. Zastosowanie odpowiednich narzędzi, jakie proponują koncepcje lean, pomaga w sposób właściwy zdefiniować obecne stany procesów, określić tzw. wąskie gardła oraz zaprojektować i zaplanować usprawnienia. Jednym z takich narzędzi lean jest mapowanie procesów oraz mapowanie strumienia wartości (VSM – Value Stream Mapping), które służą do bieżącego analizowania i ulepszania przepływu informacji i materiałów w przedsiębiorstwie.

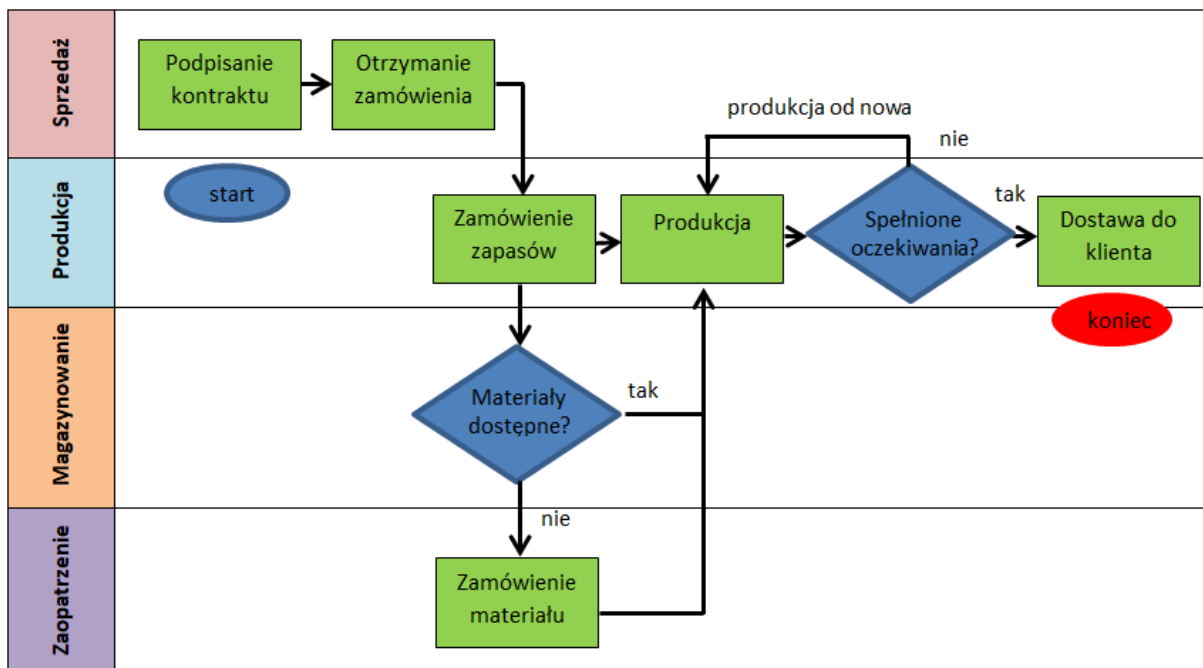
W artykule zaprezentowano wykorzystanie metodyki mapowania procesów do analizy procesu logistycznego w wybranym przedsiębiorstwie branży automotive.

¹ Magdalena.Jarzynska@polsl.pl, Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/rmt2/>

2. Problematyka mapowania

Mapowanie procesów umożliwia „szczegółowe rozpoznanie zasad i systemu funkcjonowania danego procesu przy nastawieniu na dalszy intensywny rozwój organizacji, obejmujący system zarządzania, przeprowadzenia analiz procesu lub wprowadzenia do produkcji nowych wyrobów” [1]. Mapowanie procesów, czy też mapowanie „strumienia wartości”, nazywane jest również „mapowaniem przepływu materiałów i informacji”. Jest narzędziem służącym do graficznego przedstawiania stanu obecnego oraz stanów przyszłych, idealnych, mających na celu wdrożenie rozwiązań lean w przedsiębiorstwie [2]. Mapowanie pomaga zwiualizować szczegóły procesu oraz interakcje pomiędzy poszczególnymi działami i pomaga w podejmowaniu decyzji, w przypadku gdy któreś z zaprezentowanych czynników wymaga poprawy [3].

Jeżeli firma rozpoczyna działalność lub w jej strukturach powstaje nowy dział albo wprowadza się nowy proces produkcyjny, wymaga to mapowania najważniejszych procesów. Robi się to, żeby uczestnicy zmian rozumieli nowy proces. Takie graficzne zaprezentowanie przepływu wartości oraz informacji w przedsiębiorstwie (rys. 1) jest również dobrym narzędziem wprowadzania do organizacji nowych pracowników w struktury.



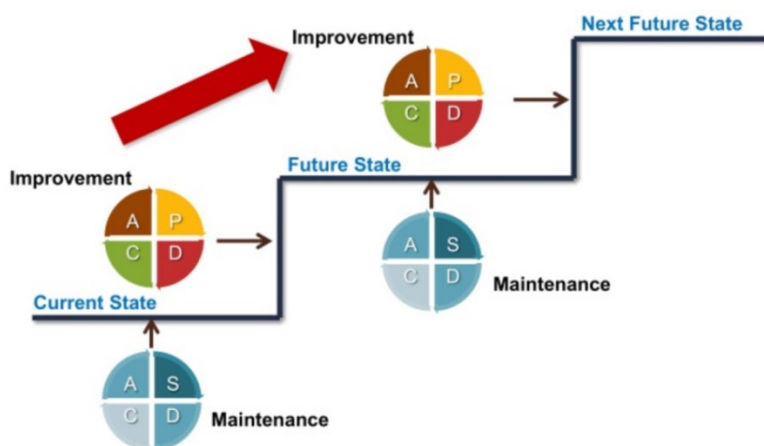
Rys. 1. Mapowanie procesów – przykład

Fig. 1. Process mapping – example

Źródło: opracowanie własne na podstawie: <https://sixsigmastudyguide.com/process-mapping/>

Mapowanie procesów skupia się na analizie wszystkich działań w ramach konkretnego procesu, pozwala zidentyfikować wszelkie działania nietworzące wartości dodanej, dzięki temu

łatwo wprowadzić drobne ulepszenia oraz zaimplementować krótkoterminowe plany [4]. Na każdym etapie mapowania procesów mamy do czynienia z cyklem Deminga (rys. 2), który ułatwia wprowadzanie uproszczeń małymi krokami oraz bieżące sprawdzanie efektów.



Rys. 2. Cykle iteracyjne od stanu bieżącego do stanu przyszłego

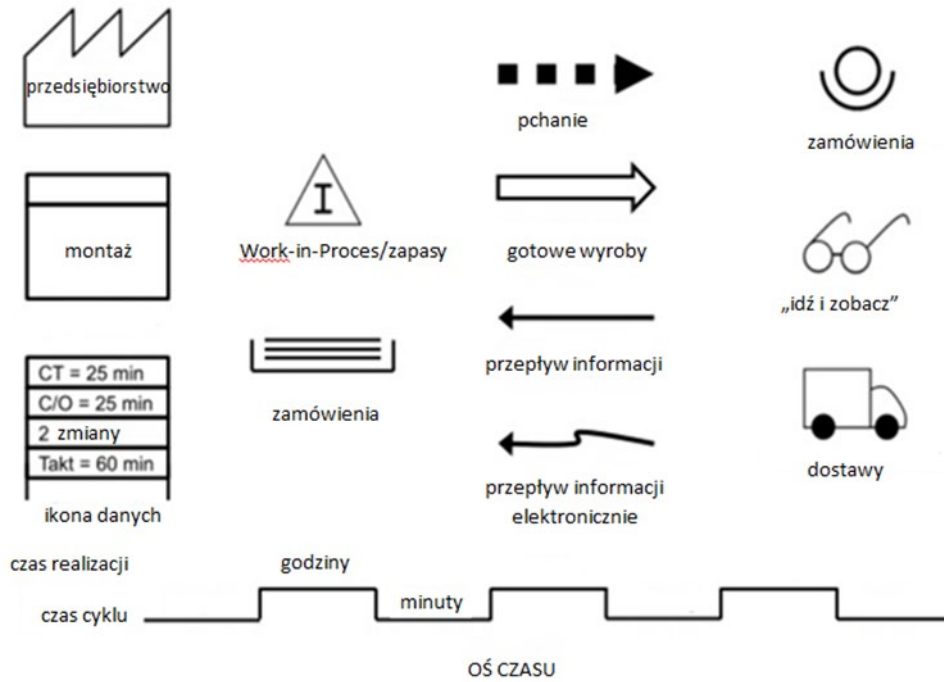
Fig. 2. Iterative cycles from current state to future state

Źródło: Operational Excellence Consulting, <https://www.oeconsulting.com.sg>

W czasie opracowywania mapy procesu należy zwrócić uwagę, że diagram procesu składa się zwykle z 5 elementów [5]:

1. START/STOP – element wskazujący początek i koniec procesu
2. WYKONANIE – element definiujący potrzebę realizacji jakiegoś zadania, procesu technologicznego
3. DECYZJA – element pozwalający rozdzielić proces na kilka ścieżek w zależności od danych wejściowych (np. produkt zgodny/niezgodny)
4. DOKUMENT – przywołany w danym kroku, procesie dokument z informacjami niezbędnymi do wykonania
5. DANE WEJŚCIOWE I DANE WYJŚCIOWE – input lub output z procesu, czyli wszystko to, co jest niezbędne do wykonania danego zadania. Na przykład wchodzi surowy materiał, wychodzi produkt plus odpad.

Do budowy mapy stosuje się określone ikony (rys. 3), uniwersalne niezależnie od gałęzi gospodarki czy kraju, w którym działa firma. Podczas tworzenia mapy należy dokładnie zidentyfikować poszczególne operacje w zakresie każdego z procesów. Każdy blok zawiera działanie lub grupę działań, które występują przed pojawieniem się znaczącej przerwy na osi czasu.

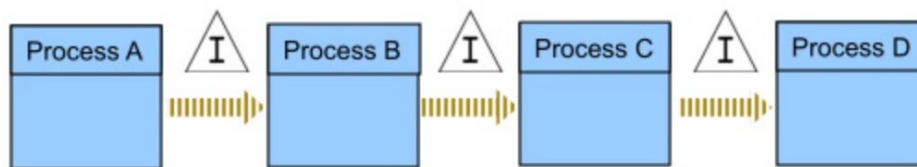


Rys. 3. Podstawowe ikony używane w mappingu procesów

Fig. 3. Basic icons used in process mapping

Źródło: opracowanie własne w oparciu o Operational Excellence Consulting, <https://www.oeconsulting.com.sg>

Właściwe zdefiniowanie operacji składających się na dany proces ułatwia prawidłową analizę występujących wewnątrz interakcji lub ich braku (rys. 4).

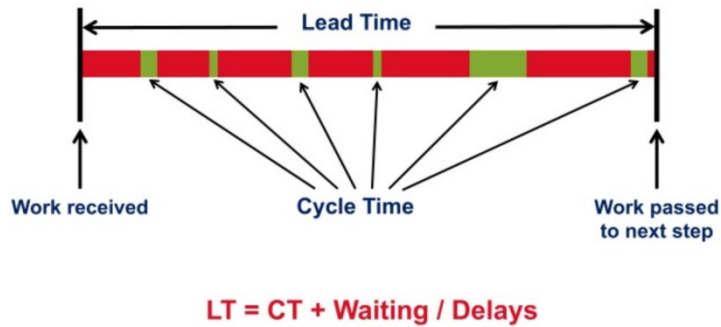


Rys. 4. Definiowanie procesów

Fig. 4. Defining processes

Źródło: Operational Excellence Consulting, <https://www.oeconsulting.com.sg>

Dla realizacji wszystkich operacji i działań procesowych istotne jest określenie ram czasowych – stwarza to okazję do możliwych optymalizacji. W celu prześledzenia czasów bieżących mierzy się czas cyklu, czasy przezbrojenia, czasy dostępności maszyny, dostępny czas pracy (pomniejszony o przerwy). Zapis czasowy pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Czasy procesów

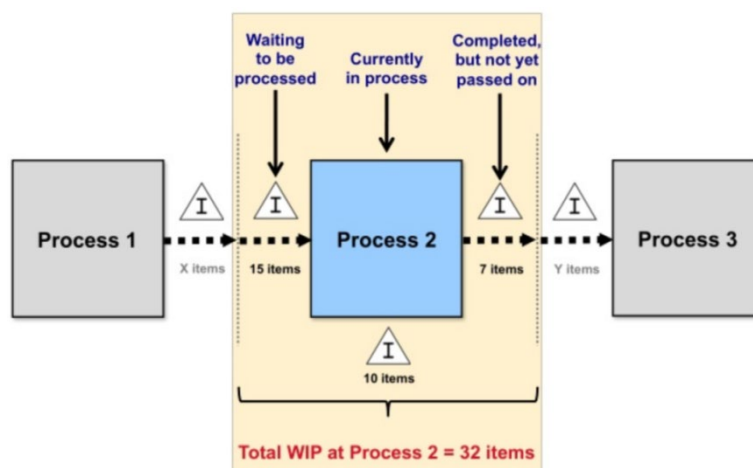
Fig. 5. Process times

Źródło: Operational Excellence Consulting <https://www.oeconsulting.com.sg>

Dla pojedynczego procesu tworzy się tabelę czasową. Tabela taka zawiera parametry odnoszące się do pięciu charakterystyk czasowych analizowanego działania:

C/T = 1 sekunda
C/O = 1 godzina
Dostępność = 85%
Dostępne 27 600 sekund
EPE = 2 tygodnie

gdzie C/T to czas cyklu, C/O – czas przebrojenia, EPE – wielkość partii produkcyjnej wyrażonej w dniach. Na WIP (Work-in-Process) składają się również czasy związane z koniecznością oczekiwania na półprodukty, części lub czekaniem, aż poprzedni element zejdzie ze stanowiska, oraz czas, kiedy produkt już jest gotowy, ale jeszcze nie przechodzi dalej. Na rys. 6 pokazano przykładowe typy działań w ramach wybranego procesu.

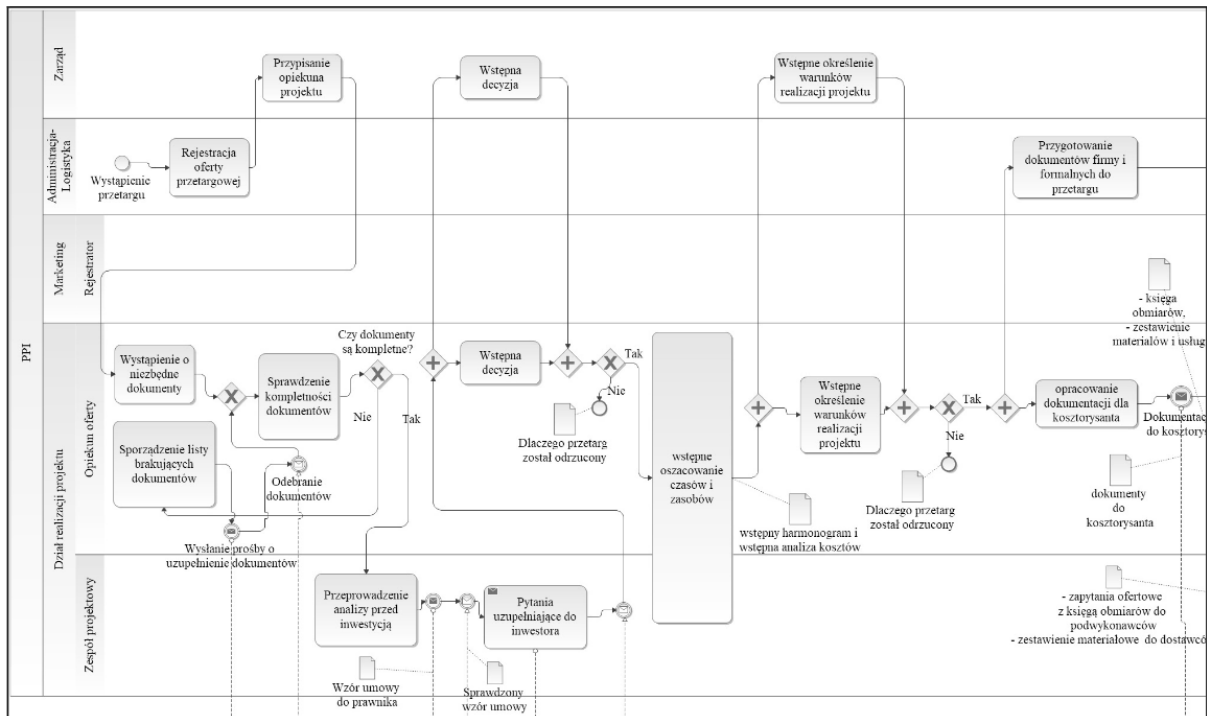


Rys. 6. Typy działań w ramach procesu (Work-in-Process = WIP)

Fig. 6. Types of activities within the process (Work-in-Process = WIP)

Źródło: Operational Excellence Consulting, <https://www.oeconsulting.com.sg>

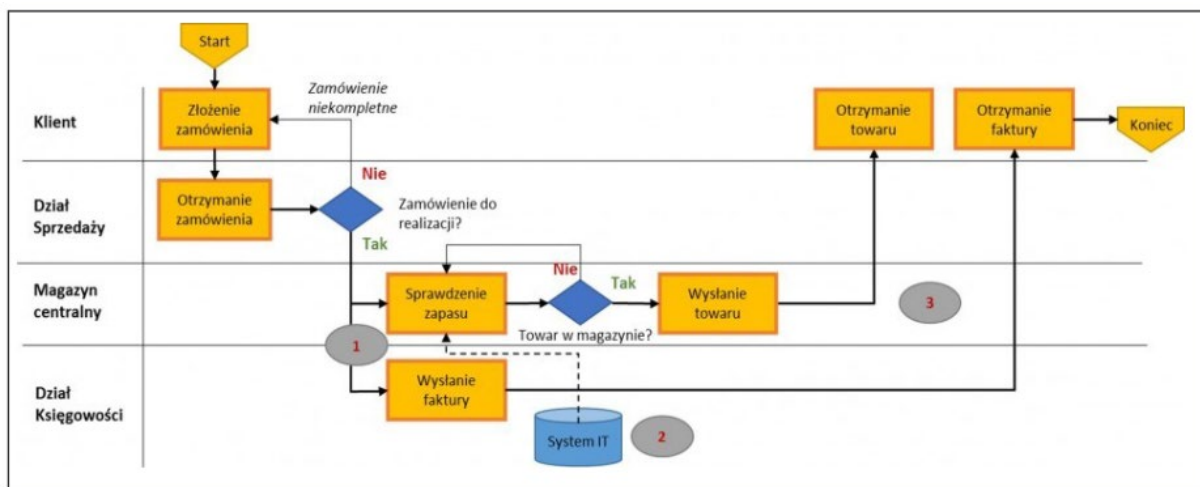
W zakresie branż praktycznie nie ma ograniczeń, jeśli chodzi o stosowanie metody mapowania procesów. Wszędzie, gdzie widoczna jest potrzeba usprawnienia działania, można tego dokonać przez zmapowanie istniejących działań oraz porównanie ich z idealnymi założeniami. Niezależnie od liczby procesów oraz różnorodności branż mapowanie może pomóc w przygotowaniu przedsiębiorstwa do wdrożenia systemów klasy ERP [6] czy systemów jakości z grupy ISO. Rysunki od 7 do 9 pokazują przykładowe mapy procesów dla różnych typów procesów.



Rys. 7. Przykład mapy procesów w przygotowaniu oferty przetargowej (branża budowlana)

Fig. 7. An example of a map of processes in the preparation of a tender offer (construction industry)

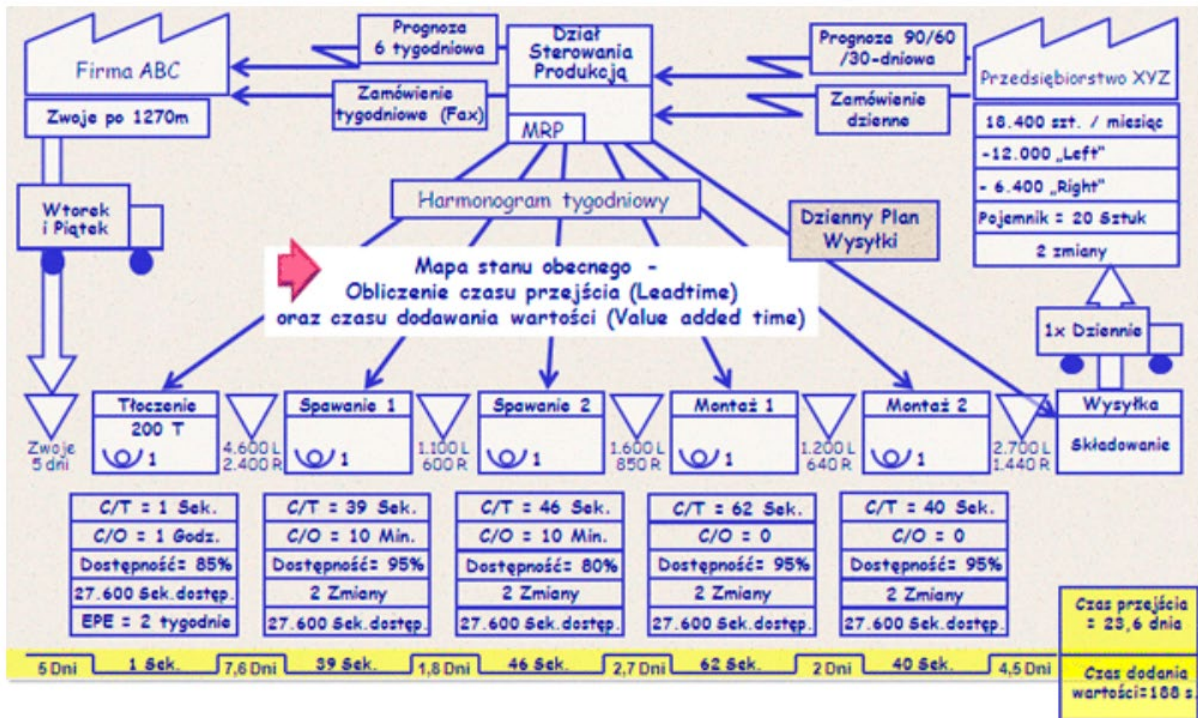
Źródło: T.Chlebus, „Mapowanie procesów przygotowania oferty realizacji przedsięwzięcia budowlanego”, ptzp.org.pl



Rys. 8. Schemat procesów administracyjnych (usługi – sprzedaż)

Fig. 8. Scheme of administrative processes (services – sales)

Źródło: Katarzyna Krygowska, „Zarządzanie procesowe”, s. 390, pwsz.krosno.pl



Rys. 9. Przykład mapowania procesów w produkcji

Fig. 9. Example of process mapping in production

Źródło: www.rekord.com.pl

Dzięki mapowaniu z łatwością można zidentyfikować miejsce, tzw. „wąskie gardło”, w którym problem jakościowy czy produkcyjny się pojawia. Kaoru Ishikawa, twórca m.in. diagramu przyczynowo-skutkowego nazywanego wykresem „rybiej ości”, umieścił metodę VSM wśród siedmiu podstawowych narzędzi jakości, dzięki którym każda firma potrafi zdefiniować wszystkie swoje procesy przez proste schematy blokowe. Dzięki temu podejściu przebieg procesów staje się bardziej zrozumiały, przez co nawet nieprzygotowani pracownicy mogą podjąć się analizy realizowanych procesów i pomóc we wskazaniu problemów bądź „wąskich gardeł”.

Przy budowaniu diagramu procesów warto się oprzeć na metodzie 5W2H dla każdego etapu procesu. Metoda 5W2H to podejście oparte na układzie siedmiu pytań [7]:

1. What? Czyli co dokładnie się stało i czego dotyczy. Szczegółowy opis niezgodności.
2. Who? Czyli kto jest zaangażowany w proces.
3. Where? Gdzie występuje sytuacja, czy klient może być narażony.
4. When? Kiedy sytuacja wystąpiła, czy sytuacja się powtórzyła.
5. Why? Na tym etapie staramy się zrozumieć sytuację.
6. How? Jak problem został wykryty.
7. How many? Jak duża jest populacja niezgodnego materiału.

Poza powyższą metodą można zastosować również technikę GEMBA, która pozwala uzyskać szerszą perspektywę problemu. Rozwiązanie to, pomagające w organizacji pracy, produkcji i procesów, w skrócie polega na obserwacji miejsca, w którym pojawił się problem,

analizie tego, co się wydarzyło, oraz określeniu przyczyny. „Na każde miejsce tworzenia wartości należy patrzeć przez pryzmat celu, procesu oraz ludzi. Pytanie zadane w sposób nieco prostszy i nieco bardziej dosłowny brzmiałoby: „czy kadra zarządzająca ukierunkowuje ludzi i procesy na osiągnięcie celu?” [8].

Dobrym rozwiązaniem jest również rozdzielenie pracy nad mapami procesów wśród wszystkich ich uczestników. Dzięki temu uzyskać można spostrzeżenia z różnych perspektyw odnoszące się do danego problemu (rys. 10).



Rys. 10. Elementy procesu zbierania danych do zmapowania problemu

Fig. 10. Elements of the data collection process to map the problem

Źródło: opracowanie na podst.: Rakoczy J., „Mapowanie procesu – wszystko co musisz wiedzieć”, www.inzynierjakosci.pl

Zachowując powyżej wskazaną kolejność działań, można przeanalizować każdy proces i każdą operację w ramach działalności przedsiębiorstwa.

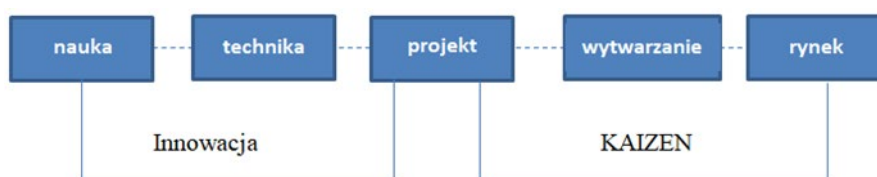
3. Zakres pojęcia innowacji

Współczesne przedsiębiorstwa mierzą się z dynamicznie zmieniającym się otoczeniem, presją stale rozwijającej się konkurencji oraz stale rosnących wymagań klientów [9]. Odpowiedzią przedsiębiorstw na te zmiany jest ciągle doskonalenie organizacji wraz ze wszystkimi procesami i wdrażanie innowacyjnych rozwiązań. Wdrażanie innowacji można ująć w ramy kompleksowego procesu zaproponowanego przez Cyferta [10], według którego jest to łańcuch logicznie powiązanych działań, polegających na takiej transformacji zasobów, że z punktu widzenia klienta wartość rezultatu na wyjściu jest wyższa niż wartość na wejściu. Na proces wdrażania składają się następujące działania: projektowanie, tworzenie, wykorzystanie i sprzedaż (komercjalizacja) innowacji [11]. W propozycji zaprezentowanej przez Tidda, Bessanta i Pavitta [12] proces innowacji traktowany jest jako strategicznie istotna działalność organizacji, gdyż wiąże się z odnową przedsiębiorstwa – tego, co i jak przedsiębiorstwo wytwarza i oferuje, a celem jest przetrwanie i wzrost przedsiębiorstwa. Proces innowacji obejmuje etapy poszukiwania, wyboru, wdrażania i uczenia się [12]. Proces innowacji nie zawiera w sobie tylko pojedynczego projektu, ale wszystkie działania organizacji dążące do wytworzenia i komercjalizacji innowacji skierowane do klientów.

„Punktem wyjścia dla tworzenia innowacji jest koncepcja teoretyczna, idea. Jednak sam pomysł nie jest innowacją i nie jest też wynalazkiem. [...] Innowacje są rezultatem procesów technicznych, społecznych, ekonomicznych, prawnych, kulturowych i organizacyjnych, które można kształtować”[13].

Zasadniczo innowacje można podzielić na procesowe i produktowe [13]. Produktowa wprowadza na rynek wyroby lub usługi, które charakteryzują się nową lub znacząco udoskonaloną funkcjonalnością. Innowacja procesowa dotyczy wdrożenia ulepszonej lub nowej procedury w produkcji lub dostawach.

Wasilewski w swojej publikacji pt. „KAIZEN Tajemnica sukcesu Japonii” z 1997 roku [14] zaprezentował kolejność działań w przypadku procesu wdrażania innowacji oraz procesu Kaizen (rys. 11). Píše on również o zasadniczej różnicy pomiędzy tymi dwoma procesami mającymi na celu udoskonalanie procesów, produktów lub usług. W definicji Wasilewskiego innowacja jest postrzegana jako „spektakularna zmiana wywołana przełomem w dziedzinie techniki, wdrożeniem najnowszych koncepcji kierowania lub technik wytwarzania. Innowacja ma przebieg dramatyczny, przykuwający uwagę wszystkich”, natomiast Kaizen „przebiega bez dramatycznych napięć, subtelnie. [...] cechą (metody Kaizen) jest to, że nie wymaga skomplikowanych technik lub najnowszych technologii. [...] Najczęściej okazuje się, że to, co najbardziej potrzebne, to zdrowy rozsądek” [14].



Rys. 11. Kompleksowy łańcuch wytwarzania

Fig. 11. Complex production chain

Źródło: Wasilewski Lesław, „KAIZEN Tajemnica sukcesu Japonii”, CIM, Warszawa 1997, s. 14-19

W następnym rozdziale omówione zostanie podejście wykorzystujące mapowanie procesów do analizy tematyki wdrażania innowacji w przedsiębiorstwie przemysłowym z punktu widzenia wdrożenia rozwiązań opartych na mapowaniu procesów.

4. Mapowanie procesu w wybranym przedsiębiorstwie

Zarządzanie współczesnymi firmami jest procesem bardzo złożonym, zawierającym mnogość strumieni surowców, części, półfabrykatów, wyrobów gotowych oraz informacji, które wzajemnie się krzyżują i uzupełniają [15]. Do doskonalenia działalności przedsiębiorstwo stosuje narzędzia i techniki oparte na wizualizacji realizacji procesów. Na potrzebę niniejszego artykułu zostało wybrane przedsiębiorstwo z branży automotive. Branża ta jest najlepszym

przykładem wprowadzania innowacji procesowych – przy wielu operacjach i procesach produkcyjnych człowieka zastąpił robot. Wprowadzenie automatyzacji i robotyzacji z pewnością znacznie usprawniło przebieg procesu produkcyjnego, ponadto na pewno spowodowało wzrost bezpieczeństwa i komfort wszystkich uczestników procesu [16]. To, jak wielki wpływ na branżę motoryzacyjną mają innowacje, ilustruje poniższa tabela 1, która została utworzona na podstawie liczby patentów zarejestrowanych w 2016 roku.

Tabela 1

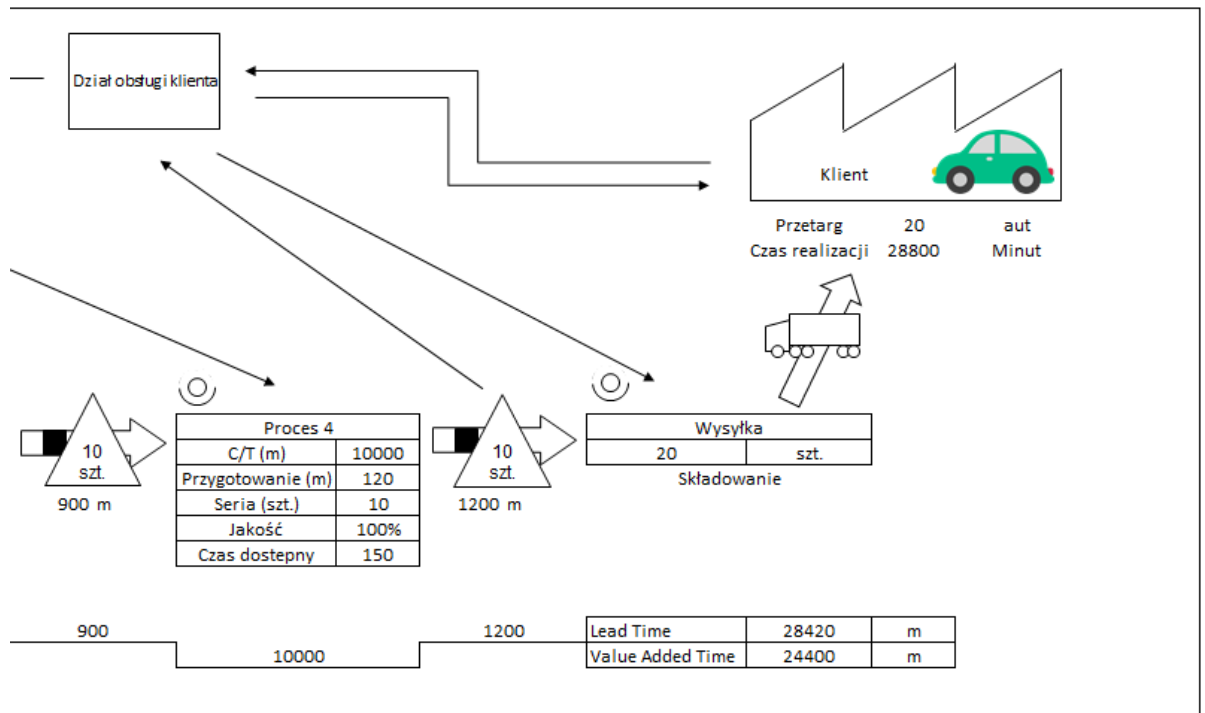
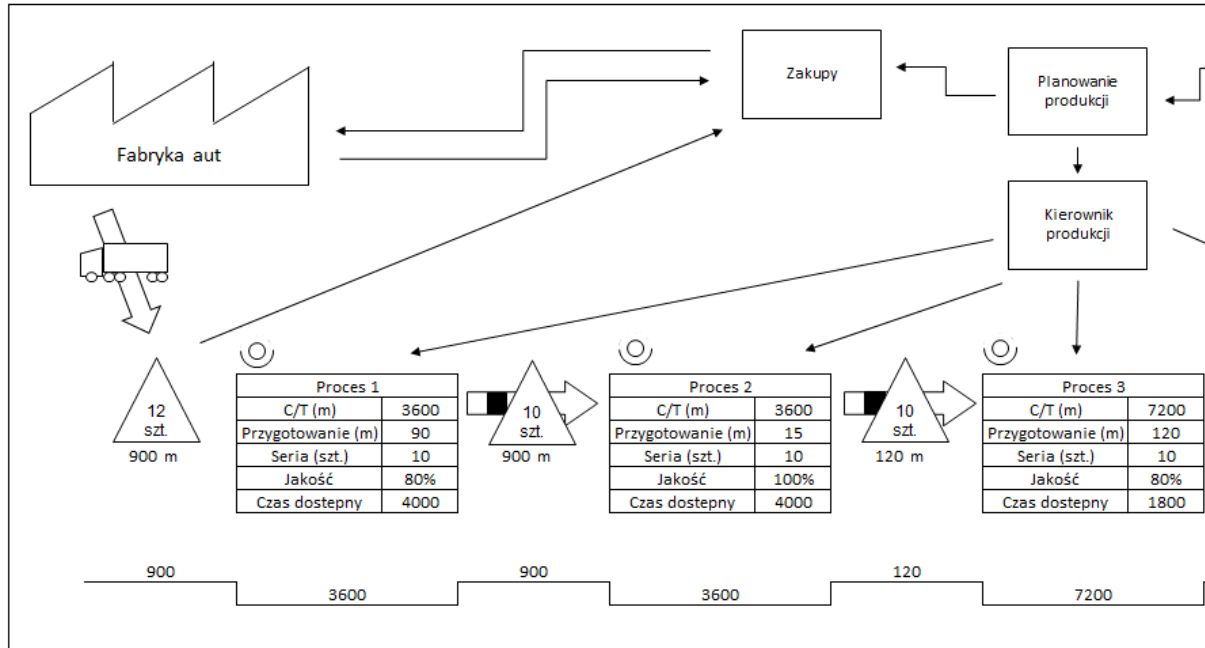
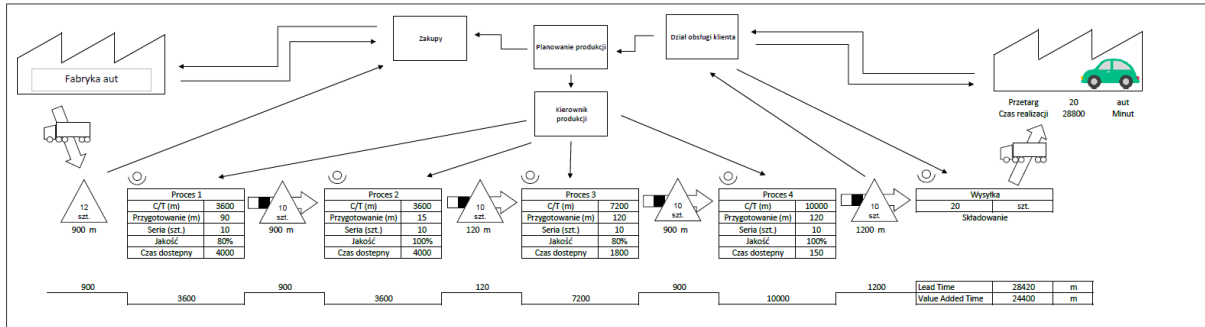
Zarejestrowane patenty motoryzacyjne w 2016 roku

Nazwa firmy	Kraj	Liczba patentów
Toyota	Japonia	3792
Hyundai	Korea Pd.	2714
Ford	USA	2048
Robert Bosch	Niemcy	2039
Denso	Japonia	1965
Volkswagen Group	Niemcy	1922
Honda	Japonia	1625
Daimler	Niemcy	1551
GM	USA	1140
BAIC Motor	Chiny	1106

Zródło: Piłka Marta, „Wpływ innowacji na rozwój przemysłu na przykładzie branży motoryzacyjnej”

Obecnie obserwuje się dynamiczny rozwój nowoczesnych technologii ukierunkowanych na minimalizację śladu CO₂ i, zgodną z dyrektywą Unii Europejskiej, produkcję zeroemisyjnych samochodów. W związku z tym producenci aut, żeby zachować godną pozycję wśród konkurencji, rozpoczęli kampanię wprowadzania innowacyjnych rozwiązań technologicznych w zakresie produkcji. Postęp widoczny jest chociażby na przykładzie przedsiębiorstwa Toyota, które do lipca 2022 roku (tabela 1 pokazuje dla porównania liczbę patentów w całym roku 2016) zgłosiło ponad 1300 patentów na baterie ze stałym elektrolitem [17], co pozycjonuje to przedsiębiorstwo w czołówce światowej.

W wybranym do analizy przedsiębiorstwie branży automotive badane procesy przebiegają w sposób tradycyjny, z wykorzystaniem pracy ręcznej. Na rysunku 12 została przedstawiona uproszczona mapa procesów w tym przedsiębiorstwie.

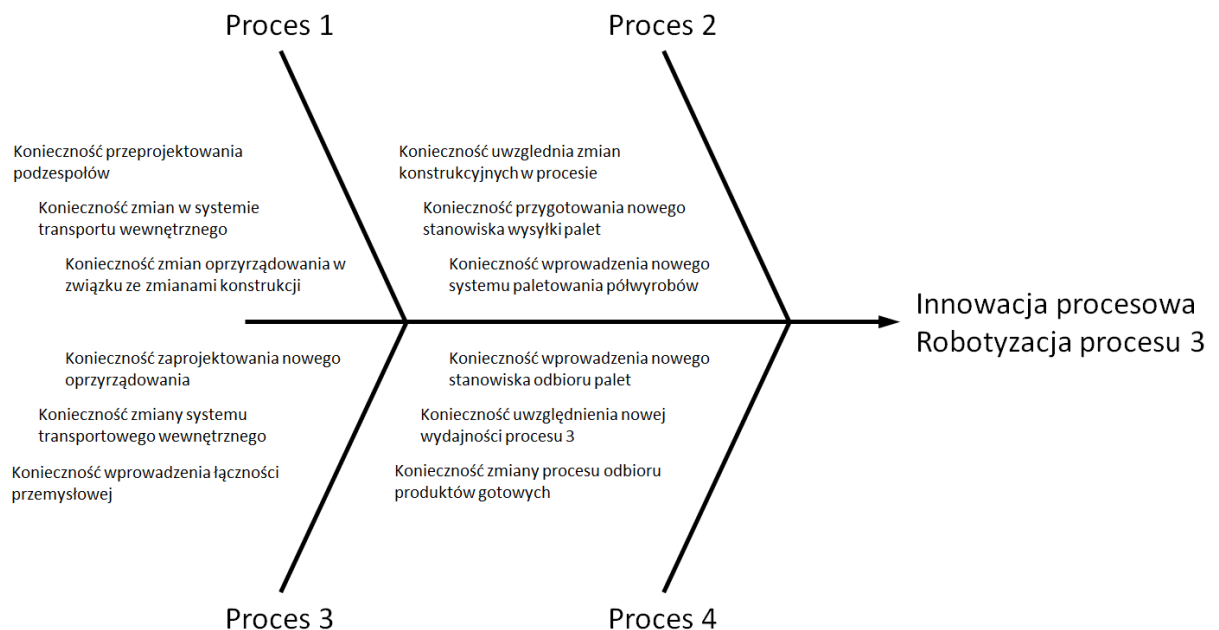


Rys. 12. Uproszczona mapa procesów w fabryce aut
 Fig. 12. Simplified map of processes in a car factory
 Źródło: opracowanie własne

Prowadzone badania dotyczyły analizy kwestii zaimplementowania innowacji procesowej w postaci wprowadzenia robotyzacji w procesie 3. Zmiana ta ma znaczący wpływ na strukturę realizowanych procesów i ich wybrane elementy. Stąd też przeprowadzono badania wykorzystujące mapowanie procesów do analizy skutków tego działania. W tym miejscu należy podkreślić, że ze względu na tajemnicę handlową nie jest możliwe bardziej precyzyjne przedstawienie specyfiki analizowanych procesów.

Zgodnie z tym, co wspomniano uprzednio, wprowadzona innowacja procesowa będzie mieć wpływ na wszystkie operacje następujące po tym procesie. Między innymi skróceniu ulegną wszystkie czasy przewidywane na poszczególne działania w procesie 3. Można także wnioskować, że nastąpi ograniczenie zapasów międzyprocesowych pomiędzy procesem 2. a 3. Jest także w pewnym zakresie prawdopodobne, że ograniczenie zapasów wystąpi także pomiędzy procesem 3. a 4. oraz procesem a wysyłką gotowego towaru do klienta. Jednakże nie można z całą pewnością stwierdzić, że będą to wszystkie skutki tego procesu i że dotkną jedynie procesu 3. oraz 4. a także wysyłki gotowych produktów.

Korzystając z podejścia GEMBA, dokonano analiz poszczególnych procesów pod względem skutków związanych z robotyzacją procesu 3. Wyniki przeprowadzonych obserwacji i analiz przedstawiono na diagramie Ishikawy (rys. 13).



Rys. 13. Wyniki analizy GEMBA

Fig. 13. GEMBA analysis results

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzone badania na terenie zakładu pracy pokazały, że pomimo koncepcji wdrożenia innowacji procesowej w ramach procesu 3. wszystkie procesy wyszczególnione w ramach systemu wytwórczego badanego przedsiębiorstwa będą dotknięte tą zmianą. Analiza pokazała, że wprowadzenie pełnej automatyzacji procesu 3. przełoży się zarówno na konieczność przeprojektowania części podzespołów, jak i na zmiany w samych poszczególnych

operacjach technologicznych nie tylko w ramach procesu 3. Na przykład zmiany konstrukcyjne części podzespołów, w celu dopasowania ich kształtu do wymogów manipulacyjnych związanych z wykorzystaniem robotów, powodują konieczność zmiany części oprzyrządowania technologicznego wykorzystywanego w ramach wszystkich czterech procesów. Oczywiście jest, że największe zmiany będą dotyczyły procesu 3.

Drugim elementem, który należy uwzględnić, jest kwestia przebudowy systemu transportowego. W przypadku procesów 1. oraz 4. jest to związane z przekonstruowaniem niektórych podzespołów, co wymusza zmianę sposobów paletyzowania elementów, a zwłaszcza konstrukcji pryzm. Z kolei w przypadku procesów 2. oraz 3. pojawia się konieczność innego składowania i transportowania elementów, tak by palety z podzespołami mogły być obsługiwane bezpośrednio przez roboty przemysłowe. Tym samym elementy w tych procesach muszą być na paletach pozycjonowane.

Możliwy problem jest też związany z większą wydajnością procesu 3., co wymusza na procesie 4. dostosowanie się do tego czynnika, w innym przypadku proces 4. będzie stanowił nowe wąskie gardło. Istotna także jest kwestia decyzji w sprawie pracowników, którzy nie będą potrzebni dalej do realizacji zautomatyzowanego procesu 3. Prawdopodobnie konieczne będzie przekwalifikowanie pracowników i przesunięcie ich na inne stanowiska, jeżeli nie rozwiązanie z nimi umów o pracę.

5. Podsumowanie

Bycie innowacyjnym jest obecnie wyzwaniem dla każdego przedsiębiorstwa w branży motoryzacyjnej. Odpowiednie przygotowanie organizacji produkcji wraz z opracowaniem dokładnych map procesów oraz opisanie ich wzajemnych zależności i powiązań jest niezbędną czynnością przed wdrożeniem każdej innowacji. Uzyskane w powyższej symulacji wyniki pozwoliły na optymalizację niektórych elementów tego procesu oraz na wskazanie zakresu problemów do rozwiązania.

Jasne jest, że wprowadzanie innowacji procesowych na wcześniejszych etapach procesu produkcyjnego wymaga lepszego przygotowania organizacyjnego oraz przeprowadzenia bardziej złożonych działań związanych z jego reharmonogramowaniem i ewentualnymi zmianami w szczegółowych mapach procesu. Jednakże, jak pokazano na przykładzie analizowanego procesu, również wprowadzanie innowacji na dalszych etapach procesu wytwarzania wpływa na konieczność zmian na etapach wcześniejszych, może tylko w trochę mniejszym zakresie.

Należy podkreślić, biorąc pod uwagę przemysłową praktykę, że wspólne cele przedsiębiorstw są często interpretowane w poszczególnych działach jedynie funkcjonalnie i rozpatrywane w izolacji. Chociaż współpraca międzywydziałowa jest dziś powszechna, cele

na najniższym poziomie nadal wydają się odizolowane i indywidualne. Jednak przy bardziej holistycznym podejściu można osiągnąć wspólne cele całego procesu działania organizacji, w których pracownicy widzą i rozumieją swój wkład. Narzędziem pozwalającym osiągnąć tego rodzaju wyniki jest między innymi mapowanie procesów pozwalające na zwizualizowanie całości działań organizacji i wskazanie miejsc, w których poszczególni pracownicy przyczyniają się do zwiększenia wartości całego procesu. Pozwala to także na poprawę wyników operacyjnych i zwiększenie motywacji pracowników. Jeden wspólny cel dotyczący zwiększania wartości procesu wytwórczego całej organizacji to możliwość wykorzystania istniejących rezerw produkcyjnych w celu skrócenia czasu wprowadzenia produktu na rynek, a także obniżenia kosztów rozwoju produkcji. Cel ten nie jest osiągany przez jeden dział funkcjonalny, ale realizowany wspólnie przez wszystkie komórki organizacyjne powiązane procesem, co w sposób jasny uwidacznia mapa procesów.

Bibliografia

1. Rakoczy Jacek, *Mapowanie procesów – 8 kroków wdrożenia* www.leanactionplan.pl
2. Rother Mike, Shook John, *Naucz się widzieć. Eliminacja marnotrawstwa poprzez mapowanie strumienia wartości*, Wrocław 2018 r.
3. Hessing Ted, sixsigmastudyguide.com
4. Operational Excellence Consulting <https://www.oeconsulting.com.sg>
5. Mydlarz Artur, *Diagram procesu – zdefiniuj proces, aby nie chodzić w kółko*, www.inzynierjakosci.pl, 2018 r.
6. Tomasz Chlebus *Mapowanie procesów przygotowania oferty realizacji przedsięwzięcia budowlanego*, s. 565, ptzp.org.pl
7. Mydlarz Artur, *Ciągle doskonalenie*, www.inzynierjakosci.pl, 2017.
8. Shook John, *O tym, w jaki sposób należy chodzić do Gemba: Idź i zobacz, zapytaj dlaczego, okaż szacunek*, Lean Enterprise Institute.
9. Cyfert Szymon, Krzakiewicz Kazimierz, *Nauka o organizacji*, Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa, Poznań 2009.
10. Cyfert Szymon, „Strategiczne doskonalenie architektury procesów w zarządzaniu przedsiębiorstwem”, Akademia Ekonomiczna w Poznaniu, Poznań 2006, s. 22.
11. Mielcarek Paweł, *Koncepcja dojrzałości procesu innowacji*, Nauki o Zarządzaniu, 2014, v. 20, s. 55-66.
12. Tidd, Bessant, Pavitt *Managing Innovation. Integrating Technological, Market and Organizational Change*, 3rd edition, John Wiley & Sons, Chichester 2005, p. 67-68.
13. Repetowski Radosław ZSP *Rola innowacji w funkcjonowaniu przedsiębiorstw przemysłowych*, Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego, 10, 2008, s. 173-187.

14. Wasilewski Lesław, „KAIZEN Tajemnica sukcesu Japonii”, CIM, Warszawa 1997, s. 14-19.
15. <https://www.rekord.com.pl/erp-artykuly/analiza-i-wizualizacja-procesow-oraz-systemow-produkcyjnych>
16. Piłka Marta, *Wpływ innowacji na rozwój przemysłu na przykładzie branży motoryzacyjnej*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Humanitas, 2019, nr 1, s. 25.
17. www.toyota.pl

MAPOWANIE PROCESÓW KOMERCJALIZACJI INNOWACJI W WYBRANEJ BRANŻY

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę wpływu tworzenia map procesów w przedsiębiorstwach przemysłowych na poprawę komercjalizacji innowacji. Mapy procesów, jako wizualizacja całego systemu powiązań i działań organizacji lub jej poszczególnych jednostek organizacyjnych, pozwalają na łatwiejsze ustalenie relacji, które mają wpływ na analizowane procesy komercjalizacji w realiach konkretnych przedsiębiorstw. W opracowaniu przedstawiono też przykład wykorzystania omawianego podejścia do analizy procesu wdrożenia innowacji procesowej w ramach wybranego etapu procesu wytwarzania. Wykorzystano też analizę powiązań opartą na diagramie Ishikawy. Wyniki pokazują, że niezależnie od typu zmiany wprowadzanej w procesie jej skutki mogą się rozprzestrzeniać zarówno w przód, jak i w tył jego biegu. Opracowanie to też pokazuje aspekty praktyczne tworzenia analiz procesów i ich zmian na podstawie map procesów i diagramów przyczynowo-skutkowych.

Słowa kluczowe: mapowanie procesów, wdrażanie innowacji

MAPPING THE COMMERCIALIZATION PROCESSES OF INNOVATIONS IN A SELECTED INDUSTRY

Abstract

The article presents an analysis of the impact of the process of creating process maps in industrial enterprises on the improvement of the innovation commercialization process. Process maps, as a visualization of the entire system of connections and activities of an organization or

its individual organizational units, allow for easier determination of relationships that affect the analyzed commercialization processes in the realities of specific enterprises. The study also presents an example of using the discussed approach to analyze the process of implementing process innovation within a selected stage of the manufacturing process. An analysis of links based on the Ishikawa diagram was also used. The results show that regardless of the type of change introduced in the process, its effects can spread both forward and backward. This study also shows the practical aspects of creating process analyzes and their changes based on process maps and cause-and-effect diagrams.

Keywords: process mapping, innovation implementation

Mateusz KAWULOK¹, Michał MAĆKOWSKI², Adam ZIĘBIŃSKI³

PLATFORMA EDUKACYJNA DLA OSÓB NIEWIDOMYCH DOSTOSOWANA DO ALTERNATYWNEJ PREZENTACJI GRAFIKI DOTYKOWO-DŹWIĘKOWEJ

1. Wstęp

Wśród głównych celów edukacji znajduje się nabycie zdolności i kompetencji potrzebnych do życia w społeczeństwie. Jednym z kluczowych elementów procesu edukacji jest zapewnienie uczniom odpowiednich materiałów naukowych, które ułatwią zdobywanie wiedzy i umiejętności. Materiały te często pozwalają także na wykorzystanie wielu zmysłów w procesie poznawczym, co umożliwia lepsze zrozumienie i utrwalenie wiedzy. Na przykład materiały wizualne takie jak diagramy, schematy, wykresy mogą pomóc uczniom w zrozumieniu trudnych koncepcji. Niewątpliwie kluczowy jest w tym wypadku zmysł wzroku, który pozwala się zapoznać ze wspomnianymi materiałami. W przypadku osób niewidomych cały proces poznawczy jest utrudniony, ponieważ jeden ze zmysłów uległ u nich trwałemu uszkodzeniu. Rodzi to problemy związane z dostosowaniem metod edukacji do potrzeb osób z niepełnosprawnościami wzrokowymi. Jest to istotny problem, ponieważ według danych Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) na świecie żyje około 285 milionów osób z problemami wzroku, w tym 39 milionów osób jest całkowicie niewidomych [1, 2].

Powszechnie stosowanym rozwiązaniem adaptacji materiałów tekstowych do potrzeb osób niewidomych jest alfabet (system) Braille'a pozwalający na zakodowanie 63 znaków w postaci 6 punktów określanych jako symbol tworzący. Skutecznym rozwiązaniem w dzisiejszych czasach okazały się również czytniki ekranu [3, 4] wypierające powoli wspomniany alfabet. Dla osób niewidomych grafiki i wykresy (informacja strukturalna) często spotykane w zadaniach związanych z naukami ścisłymi stanowią problematyczną kwestię. Osoby te nie

¹ Mateusz.Kawulok@polsl.pl, Katedra Systemów Rozproszonych i Urzędzeń Informatyki, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska, <http://polsl.pl/rau8/>

² Michal.Mackowski@polsl.pl, Katedra Systemów Rozproszonych i Urzędzeń Informatyki, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska, <http://polsl.pl/rau8/>

³ Adam.Ziebinski@polsl.pl, Katedra Systemów Rozproszonych i Urzędzeń Informatyki, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska, <http://polsl.pl/rau8/>

są w stanie odczytać informacji przedstawionej w formie wizualnej i wymagają zastosowania alternatywnych metod prezentacji danych. Z pomocą przychodzą w tym przypadku rozwiązania wykorzystujące druk brajlowski i wydruk 3D, służące do przygotowania materiałów wypukłych (ang. tactile image). Takie wydruki zawierają wypukłe linie możliwe do analizy, przez co użytkownik może zapoznać się z nimi za pomocą percepcji dotykowej [5, 6]. Wśród czynników wpływających na poprawność rozpoznawania obiektów na obrazach znajdują się m.in. wielkość, kształt czy też poziom skomplikowania elementu graficznego [7].

Dotychczas przeprowadzonych zostało wiele badań związanych z adaptacją grafik oraz powstawały dokumenty zawierające wytyczne dla tego procesu, wśród których wyróżnia się zbiór reguł „Guidelines and Standards for Tactile Graphics”, stworzony przez Braille Authority of North America oraz Canadian Braille Authority [8]. Jest to kompendium wiedzy na temat dostosowywania grafik do potrzeb osób niewidomych i pozwala na pokonanie barier związanych z brakiem dostępu do graficznych materiałów edukacyjnych.

Nadmienić jednak należy, że w wielu przypadkach sam rysunek wypukły nie jest wystarczający do przekazania wszystkich koniecznych informacji zawartych na obrazie. Dzieje się tak w momencie, kiedy rysunek zawiera np. wzory, twierdzenia i opisy elementów. Aby zapewnić łatwe zrozumienie i przejrzystość rysunku wypukłego dla osób niewidomych, zwykle stosuje się konwersję wspomnianych opisów z wykorzystaniem alfabetu Braille’a – opisy alternatywne są najczęściej dostarczane na osobnych kartkach, a nie umieszczane bezpośrednio na rysunku.

Wspomniane rozwiązania stosowane są bardzo powszechnie, ale sprawdzają się głównie w przypadku prostych rysunków [9]. Rozwinięciem tych metod jest wykorzystanie czytników ekranu wraz z synteizatorem mowy, które w połączeniu z wypukłą grafiką pozwalają na tworzenie obrazów dotykowo-dźwiękowych (ang. audio-tactile image), a co za tym idzie – na oddziaływanie na osobę niewidomą za pomocą dwóch zmysłów jednocześnie. Podejście to było dotychczas przedmiotem wielu badań [10, 11], a wyniki wskazują, że kompensacja zmysłu wzroku przez zmysły dotyku oraz słuchu (przy zachowaniu synchronizacji przekazu) jest dobrym podejściem sprawdzającym się w procesie edukacji. Same czytniki ekranu wraz z syntezatorami mowy nie są jednak wystarczającym rozwiązaniem dla przekazu brakującej informacji o strukturze rysunku, ponieważ bardzo często odczytują one wzory i struktury w formie, która jest niezrozumiała dla osoby niewidomej. Konieczne w tym wypadku jest zastosowanie algorytmów analizujących i upraszczających dane wyrażenie lub dostosowanie liczby przekazywanych pojęć do poziomu nasycenia poznawczego ucznia [12]. Rozwiązanie biorące pod uwagę wszystkie opisane powyżej czynniki może zostać uznane za w pełni dostosowane do potrzeb edukacyjnych osoby niewidomej.

2. Badania związane z adaptacją materiałów dotykowo-dźwiękowych

Istotnym krokiem umożliwiającym wprowadzanie nowych metod adaptacji materiałów do potrzeb osób niewidomych było przeniesienie treści dostępnych dotychczas tylko w wersji papierowej do wersji cyfrowej. W wielu publikacjach podjęty został problem usprawnienia metod opracowywania rysunków wypukłych na podstawie istniejących obrazów. Wśród nich znalazły się podejścia zakładające możliwość automatycznej konwersji bitmap [13]. Autorzy tej pracy przedstawili algorytm podzielony na trzy kroki: pozyskanie, uproszczenie i uwypuklenie grafiki. W drugim z wymienionych etapów zastosowane zostały metody przetwarzania obrazów takie jak segmentacja i wykrywanie krawędzi. Osiągnięte w ramach publikacji wyniki pozwoliły potwierdzić pozytywny wpływ dostosowywania grafik na edukację osób niewidomych. W pracy [14] Krufka i Braner przedstawili podobne podejście, ale na podstawie innego formatu graficznego – SVG. Dzięki właściwościom grafiki wektorowej możliwe było zróżnicowanie uwypuklenia elementów wydrukowanych na drukarce brajlowskiej.

W pracy [15] skupiono się już głównie na adaptacji materiałów przeznaczonych do nauki przedmiotów ścisłych, tj. matematyki i fizyki. Cały przedstawiony przez autorów proces został podzielony na kilka etapów. W pierwszych krokach z obrazu usuwane były wszystkie napisy, w tym również cyfry i wzory, a następnie były one tłumaczone na zapis w systemie Braille'a. Tak skonwertowane opisy były umieszczane ponownie na oryginalnej grafice. Wadą tego rozwiązania była niestety duża nadmiarowość informacji, które pozostają na rysunku. Podobne podejście przedstawił Lander et al. [16], opisując opracowane w ramach badań narzędzie TGA (Tactile Graphics Assistant).

Naturalnym rozwinięciem użycia standardowych rysunków wypukłych stało się połączenie ich z najnowszymi rozwiązaniami technicznymi. Podejmowane są również próby zastąpienia rysunków wypukłych przez jedno urządzenie. Wśród tej drugiej grupy wyróżniają się dynamiczne wyświetlacze dotykowe. Zasada ich działania polega na mechanicznym wypychaniu igieł znajdujących się na ekranie w zależności od obecnie wyświetlanego źródła danych [17]. Przykładami takich wyświetlaczy są DotView od firmy KGS Corporation oraz Graphiti od ORBIT Research. Wśród wad takich rozwiązań są niestety mały obszar możliwy do prezentacji oraz wysoka cena urządzenia, sięgająca od 5 do 40 tysięcy euro.

Wśród rozwiązań związanych z połączeniem opisywanych wydruków wypukłych z nowoczesnymi narzędziami na pierwszy plan wysuwają się zastosowania tabletów o dużych przekątnych (mających około 13 cali). Dzięki użyciu takich urządzeń możliwe jest odtwarzanie komunikatów w zależności od dotykanego elementu. W tej dziedzinie zaprojektowano i zweryfikowano użyteczność kilku podejść. Pierwszym badaniem ze wspomnianej grupy jest zastosowanie kodów QR i kamer wideo [18, 19, 20]. Autorzy przez analizę rejestrowanego obrazu i miejsca dotyku odtwarzali komunikaty głosowe przypisane do odpowiedniego kodu QR. Rozwinięciem tej metody stało się zastosowanie metod sztucznej inteligencji. W publikacjach [21, 22, 23] opisane zostały badania opierające się na rozpoznawaniu w czasie

rzeczywistym palców człowieka i dotykanych przez nie elementów na obrazie. Niestety całe rozwiązanie wymagało użycia dodatkowych znaczników w celu zapewnienia poprawnej identyfikacji i działania. W obu przedstawionych metodach rezultaty zależały również od oświetlenia i ułożenia dłoni na obrazie wypukłym [18]. Wracając do możliwości ścisłego połączenia samego wydruku z tabletem pracującym na systemie iOS lub Android, należy wspomnieć o projekcie MIDAS [24]. W ramach tego projektu badano aktywności użytkownika na ekranie przez rejestrowanie dokładnych miejsc dotyku ekranu.

Dla osób niewidomych praca z urządzeniami elektronicznymi przebiega najłatwiej i najwygodniej właśnie za pomocą interakcji głosowych [25, 26]. Wśród wytycznych dotyczących przygotowywania takich informacji dźwiękowych warto wyróżnić książkę *Designing for Voice User Interface* napisaną przez C. Pearl [27], opartą na wywiadach z różnymi ekspertami takimi jak Chris Maury. Jednym z głównych zaleceń zawartych we wspomnianej książce jest waga personalizacji i jej wpływ na odbiór komunikatu przez osobę niewidomą. Głównymi cechami takiego przystosowania powinny być możliwości wyboru głosu syntezy, prędkości mowy oraz dostosowanie długości komunikatów. Współczesne syntezy i narzędzia starają zaadaptować wspomniane właściwości w procesie projektowania i mimo że nadal nie są pozbawione wad, to badania prowadzone w tym kierunku wykazują ich pozytywny wpływ wśród osób z różnymi niepełnosprawnościami [28, 29, 30].

3. Autorskie rozwiązanie adaptacji grafiki dotykowo-dźwiękowej

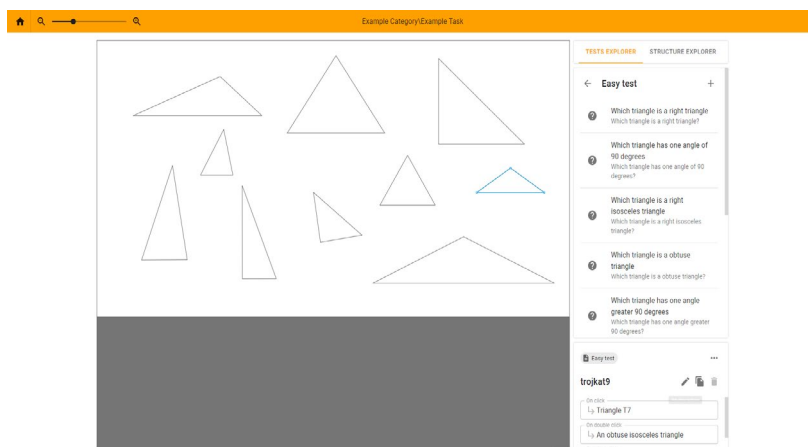
Wytyczne i wyniki badań publikacji przedstawionych we wcześniejszych punktach pozwoliły na przygotowanie autorskiego systemu (platformy) wspomagania edukacji osób niewidomych. Został on podzielony na dwa odrębne, ale współpracujące ze sobą fragmenty: aplikację internetową oraz aplikację mobilną dla systemu Android. Cały system oparty został na wspomnianych grafikach wektorowych – SVG, wydrukach wypukłych i komunikatach dźwiękowych odczytywanych za pomocą syntezy mowy.

3.1. Aplikacja internetowa

Działanie aplikacji internetowej skupia się na przygotowywaniu dostosowanych materiałów edukacyjnych dla uczniów niewidomych. Od strony administracyjnej możliwe jest tworzenie użytkowników, zarządzanie dostępem do materiałów, przypisywanie uczniów do klas i analiza wyników osiągniętych w trakcie rozwiązywania testów. Każdy nauczyciel chcący przygotować zadanie ma możliwość wgrania na platformę grafiki w postaci pliku SVG. Taki obraz można następnie udźwiękować przez przypisanie tekstowych opisów alternatywnych do określonych elementów rysunku. Ważny w kontekście opisów alternatywnych jest też podział

wprowadzony przez autorów ze względu na wykonywane przez ucznia gesty (jedno, dwa lub trzy stuknięcia palcem w element na rysunku), gdzie do różnych akcji przypisany może zostać inny opis dla danego obiektu. Dodatkową przydatną funkcją jest możliwość dodawania testów do zadań. Są one dostępne do rozwiązania przez ucznia w aplikacji mobilnej, a ich wyniki są widoczne w module nauczyciela w aplikacji internetowej. Z działaniem testów związana jest również możliwość różnicowania opisów, ponieważ autor zadania może przypisać różne komunikaty dźwiękowe do elementów obrazu w zależności od obecnie rozwiązywanego testu. Na koniec całego procesu przygotowywania zadania możliwe jest wygenerowanie pliku w formacie .pdf do wydruku na drukarce brajlowskiej. W ramach obecnych prac badawczych do systemu dodany został również mechanizm inteligentnej nauki, opierający się na koncepcji wektorów błędów [31, 32]. Mechanizm ten zostanie dokładniej opisany w ramach przedstawienia aplikacji mobilnej. Wśród rozwiązań technologicznych zastosowanych w aplikacji internetowej warto wyróżnić:

- bazę danych opartą na PostgreSQL;
 - zarządzanie i komunikację z danymi za pomocą aplikacji wykorzystującej język C# oraz bibliotekę .NET Core w wersji 7.0;
 - interfejs użytkownika wykorzystujący technologię ReactJS, opartą na języku JavaScript.
- Przykładowy widok aplikacji internetowej przedstawiony został na rysunku 1.



Rys. 1. Widok przykładowego zadania w aplikacji internetowej (opracowanie własne)
 Fig. 1. View of an example exercise in the web application (own research)

3.2. Aplikacja mobilna

Aplikacja mobilna dostosowana jest do potrzeb ucznia niewidomego. Przed przystąpieniem do rozwiązywania zadania wydruk wykonany z pomocą platformy internetowej umieszczany jest na ekranie tabletu przez nauczyciela lub ucznia, tak aby osoba niewidoma przez zapoznawanie się z obrazem za pomocą zmysłu dotyku miała możliwość wywoływania komunikatów dźwiękowych. Przy rozpoczynaniu pracy z aplikacją wymagane jest od każdego

użytkownika wykonanie kalibracji wielkości obiektów na ekranie za pomocą obrazu testowego. Ma to na celu zapewnienie poprawności odczytu odpisów, również w przypadkach, kiedy uczeń ma problemy motoryczne związane z drżącymi palcami lub dłońmi. Proces odczytywania opisów został oparty na wspomnianych wcześniej gestach. W aplikacji rozróżniane są ich 3 rodzaje: 1-tap, 2-tap oraz 3-tap (ang. tap – stuknięcie w ekran). Zasady przypisania opisów zależne są od autora zadania, ale w wytycznych dotyczących platformy umieszczone zostały sugestie określające domyślny sposób działania, w myśl których podział powinien wyglądać następująco:

- 1-tap – podstawowy opis obiektu, np. jego długość, wielkość, umiejscowienie na obrazie;
- 2-tap – dodatkowe informacje na temat obiektu, np. podstawa trapezu równoramienne;
- 3-tap – szeroki zakres teoretyczny, np. wzór na pole trapezu.

Do poruszania się po aplikacji mobilnej zaprojektowany został specjalny interfejs składający się z 6 przycisków wyświetlanych pod rysunkiem pozwalających użytkownikowi m.in. na wybór zadania i zmianę ustawień. Dodatkowo, w zależności od sytuacji, mogą one przyjmować inne funkcje, takie jak np. zaznaczenie odpowiedzi w teście. Ich działanie zostało oparte na mechanizmie zatwierdzania polegającym na podwójnym stuknięciu danego przycisku na ekranie zgodnie z następującą zasadą: jedno stuknięcie powoduje odczytanie komunikatu o akcji podpiętej pod dany element, natomiast podwójne stuknięcie wywołuje daną akcję.

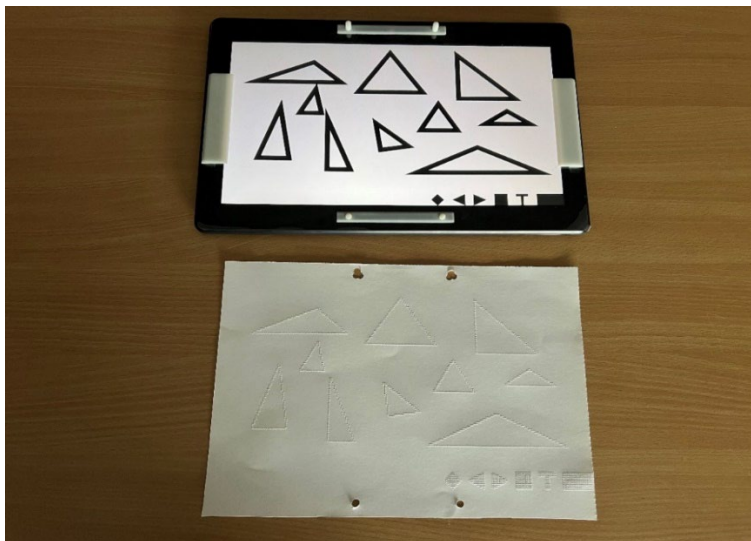
Warto na tym etapie rozwinąć wspomniany wątek związany z działaniem wektorów błędu. W obecnej wersji rozwoju aplikacji wprowadzony został system samodzielnej nauki połączony z monitorowaniem tego procesu przez nauczyciela w aplikacji internetowej. Cały mechanizm został oparty na trzech poziomach trudności i rozwiązywaniu testów. Na pierwszym etapie samodzielnej nauki uczeń otrzymuje zadanie na najwyższym poziomie trudności, gdzie ma do dyspozycji jedynie podstawowe opisy i jeżeli uda mu się rozwiązać je poprawnie, kolejne zadanie również pozostanie na tym samym poziomie, natomiast jeżeli popełni błędy, trudność zadania zostanie obniżona. Co za tym idzie – otrzyma on możliwość odsłuchania większej liczby komunikatów, a w jego wektorze błędów pod danym zagadnieniem pojawi informacja na ten temat. Korzyści z tego rozwiązania widoczne są w przypadku nauki nowych zagadnień, ponieważ na podstawie historii nauki uczeń otrzymuje nowe zadania zawsze zgodnie z jego globalnym wynikiem opisywanego wskaźnika. Nauczyciel ma w tym procesie możliwość sprawdzenia, gdzie popełnionych zostało najwięcej błędów i dzięki temu może on dostosować zadania pod kątem pracy z wybranym uczniem.

Podsumowując, działanie aplikacji opiera się na interakcji z uczniem niewidomym i przez wykorzystanie zmysłu dotyku oraz słuchu. Jednocześnie stara się przekazywać informacje w taki sposób, aby użytkownik był w stanie je zapamiętać i jak najlepiej wykorzystać. Dodatkowe mechanizmy związane z interfejsem zbudowanym z przycisków i wektorem błędów mają na celu pobudzić ucznia do samodzielnej pracy z zadaniami, przez co

możliwe jest przełamywanie barier związanych z nieśmiałością i niską samoocena. Wśród rozwiązań technologicznych zastosowanych w aplikacji mobilnej wyróżnić warto:

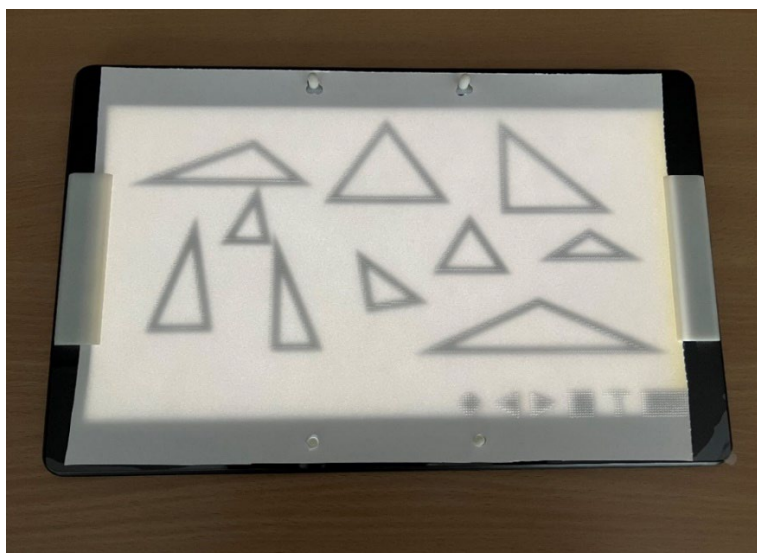
- język Kotlin, bibliotekę Retrofit do komunikacji z serwerem,
- komponent WebView umożliwiający wyświetlanie grafik w formacie SVG na ekranie aplikacji,
- język JavaScript współpracujący ze wspomnianym komponentem,
- bibliotekę TextToSpeech, pozwalającą na odczytywanie komunikatów tekstowych.

Aplikacja mobilna wraz z wydrukiem wypukłym przedstawiona została na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Widok aplikacji mobilnej na tablecie z systemem Android wraz z wydrukiem wypukłym zadania (opracowanie własne)

Fig. 2. View of the mobile application on an Android tablet with a relief printout of the task (own research)



Rys. 3. Widok aplikacji mobilnej po połączeniu z wydrukiem wypukłym (opracowanie własne)

Fig. 3. View of the mobile application after combining with the tactile print (own research)

4. Badania

Wszystkie dotychczasowe badania związane z przedstawionym rozwiązaniem przeprowadzane były we współpracy z Ośrodkiem Szkolno-Wychowawczym dla Dzieci Niewidomych im. Róży Czackiej w Laskach. Dzięki nim wprowadzone zostały niektóre z mechanizmów i rozwiązań opisanych we wcześniejszym punkcie. W trakcie pierwszych badań weryfikowane były podstawowa funkcjonalność aplikacji i możliwości jej użycia. Kolejne iteracje badań realizowane w ramach pracy magisterskiej i kontynuowane obecnie w pracy doktorskiej skupiają się na stworzeniu systemu inteligentnej nauki i rozwijaniu rozwiązania o nowe możliwości personalizacji. W trakcie prac badawczych oprócz zbierania opinii na temat narzędzia wykorzystanych zostało kilka mechanizmów zaimplementowanych po stronie aplikacji mobilnej i internetowej, takich jak monitorowanie działań ucznia za pomocą map aktywności. Są to dynamiczne podglądy aktualnie rozwiązywanego zadania, gdzie osoba nadzorująca – domyślnie nauczyciel – jest w stanie obserwować miejsca wykonywania gestów przez ucznia wraz z rozróżnieniem ich na typy. Dotychczas wyniki badań udało się przedstawić w dwóch publikacjach.

Pierwsza z nich powstała w ramach 18. międzynarodowej konferencji ICCHP (International Conference on Computers Helping People), która odbyła się w dniach 11-15 lipca w Lecco, we Włoszech [33]. W publikacji przedstawione zostały badania przeprowadzone na 40 uczniach z klas 3-6 szkoły podstawowej. Głównym weryfikowanym mechanizmem było działanie wektora błędu i dobór zadań zgodnie z poziomem ucznia. Przeprowadzone badania [33] podzielone zostały na trzy etapy. W pierwszym z nich uczniowie proszeni zostali o rozwiązywanie zadań na standardowym, tj. najtrudniejszym poziomie trudności. W trakcie tego procesu rejestrowane były wszystkie błędy popełniane w konkretnych zadaniach, co pozwoliło na ustalenie dla każdego ucznia wektora błędów [31, 32] wraz z globalnym wskaźnikiem poziomu zaawansowania. Taka klasyfikacja pozwala platformie na dostosowywanie trudności również w przypadku prób opanowywania nowego materiału. Na drugim z wymienionych etapów uczniowie mieli możliwość pracy z aplikacją, która automatycznie dostosowywała poziom zaawansowania zagadnień, w których popełniali wcześniej błędy, według autorskiego algorytmu przedstawionego w publikacji [33]. W momencie, kiedy uczeń przestał popełniać błędy w danej partii materiału, system uznawał, że został on już przez niego opanowany. Kończącym etapem była ponowna weryfikacja wiedzy analogicznie do etapu pierwszego, czyli na poziomie standardowym, tj. najtrudniejszym. Wspominane powyżej poziomy trudności zadań były ściśle związane ze szczegółowością opisów alternatywnych zgodnie z zasadą – im trudniejsze zadanie, tym krótsze i prostsze komunikaty dźwiękowe.

Uzyskane w trakcie badań wyniki [33] pozwoliły na potwierdzenie pozytywnego wpływu zastosowanego narzędzia na edukację osób niewidomych. Wśród najważniejszych zalet znalazły się takie cechy jak:

- Zastosowanie interaktywnej prezentacji dotykowo-dźwiękowej
- Wykorzystanie testów w trakcie rozwiązywania zadań
- Możliwości samodzielnej nauki
- Monitorowanie błędów i postępów ucznia
- Możliwości zastosowania narzędzia nie tylko w nauce matematyki

Druga z publikacji z przeprowadzonych dotychczas badań ukazała się w czasopiśmie ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications [7]. Skupiła się ona głównie na zbadaniu i poprawie percepcji osoby niewidomej w kontekście pracy z aplikacją mobilną. Badania przeprowadzone zostały na grupie 28 uczniów w wieku od 12 do 16 lat. Analizie poddane zostały następujące aspekty: rozpoznawanie obiektów, percepcja dotykowa, percepcja dźwiękowa i przyswajanie dodatkowej informacji umieszczonej na obrazie. Pierwsze ze wspomnianych badań zakładało weryfikację poprawności rozpoznawania obiektów na obrazie, ponieważ uczniowie mają bardzo często duże problemy z rozróżnianiem elementów na rysunku wypukłym w momencie, kiedy różnice pomiędzy długościami boków czy miarami kątów w figurach geometrycznych są niewielkie. Dzięki zastosowaniu dodatkowych alternatywnych opisów dźwiękowych elementów rysunku poprawie uległ proces odpowiedniej klasyfikacji obiektów. Poza tym osoba niewidoma trenuje swoją percepcję dotykową, ucząc się rozpoznawać nawet niewielkie różnice na obrazie wypukłym. Dzięki treningowi percepcji dotykowej niewidomi mogą lepiej orientować się w otoczeniu oraz rozpoznawać różne przedmioty i materiały. Warto również wspomnieć, że trenowanie percepcji dotykowej jest także ważne z punktu widzenia neuroplastyczności mózgu. Drugi eksperyment dotyczył dostosowywania wielkości elementów wyświetlanych na ekranie tabletu, tak aby osoba niewidoma w momencie wykonania gestu otrzymała odpowiedni komunikat dźwiękowy. Wielkość wizualizowanego elementu na ekranie tabletu (np. bok kwadratu) musi być tak dobrana, aby dotknięcie przez niewidomego ucznia tego elementu na wydruku wypukłym zainicjowało odczyt odpowiedniego komunikatu głosowego. Według wykonanych badań [7] najlepszą grubością linii okazała się wartość 30 pikseli (co przekłada się na grubość około 5 mm na tablecie 13 cali o rozdzielczości Full HD). Wszystkie wartości powyżej lub poniżej tej wartości powodowały spadek efektywności odczytu opisów alternatywnych. Trzeci eksperyment opierał się na możliwości zapamiętywania informacji przez uczniów. Głównymi analizowanymi aspektami były czas i liczba przekazywanych pojęć. Wyniki jasno wskazały, że komunikaty przekraczające 15 sekund były zbyt długie i zawierały zbyt dużo materiału, przez co stawały się niezrozumiałe dla uczniów.

Opisane narzędzie jest stale rozwijane we współpracy z ośrodkiem pracującym z osobami niewidomymi. Każda nowa funkcjonalność jest badana pod kątem możliwości jej zastosowania, co sprawia, że rozwiązanie może być wykorzystywane w praktycznej pracy z uczniami niewidomymi w trakcie zajęć.

Dzięki zmianom wprowadzonym w mechanizmie wektora błędów usprawniono jego działanie, a przez to zwiększano poprawności doboru pytań w zadaniach. Kolejnym krokiem było przeprowadzanie eksperymentów opartych na metodologii opisanej w jednej z wcześniejszych publikacji autorów [33].

W badaniach wzięło udział 15 niewidomych uczniów uczących się w klasach 4-8 szkoły podstawowej, dla których przygotowanych zostało 50 zadań związanych z własnościami figur geometrycznych o różnym poziomie trudności i szczegółowości, gdzie każde zawierało w sobie kilka zagadnień – kategorii błędów. Badanie zostało podzielone na trzy etapy. W pierwszym z nich (etap 1.) uczniowie rozwiązywali zadania na najtrudniejszym poziomie zaawansowania, co pozwoliło na określenie stanu ich wiedzy i dostosowanie poziomu trudności dla dalszego etapu. W drugim kroku (etap 2.) uczniowie mieli czas na samodzielną naukę nadzorowaną przez nauczyciela, tak aby mogli opanować problematyczne dla nich zagadnienia. Jednocześnie w tle wykorzystywany był wektor błędów, który dynamicznie dostosowywał poziom szczegółowości zadania do obecnych postępów ucznia. Ostatnim etapem (etap 3.) była ponowna weryfikacja zdobytych informacji na najtrudniejszym poziomie zaawansowania z wykorzystaniem zaproponowanej platformy. Wyniki uzyskane w trakcie badań przedstawione zostały w tabeli 1., gdzie skrót KB oznacza kategorię błędu.

Tabela 1

Wyniki z przeprowadzonych badań

Nr ucznia	Błędy popełniane przez uczniów									
	Etap 1.					Etap 3.				
	KB1	KB2	KB3	KB4	KB5	KB1	KB2	KB3	KB4	KB5
1	3	2	3	0	1	1	0	2	0	0
2	4	2	5	1	0	0	0	3	0	0
3	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0
4	2	4	3	5	3	0	2	0	4	1
5	2	3	2	1	2	1	0	0	1	0
6	0	0	4	0	0	0	1	2	0	1
7	1	1	3	0	1	1	0	0	1	1
8	4	3	3	1	2	2	0	1	0	0
9	2	1	2	0	1	0	0	0	1	0
10	3	1	4	2	1	0	2	2	0	1
11	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
12	2	2	3	1	0	1	1	0	0	1
13	3	4	2	1	5	2	2	3	0	2
14	0	2	0	0	1	1	0	0	0	1
15	5	3	1	2	1	3	3	1	0	2

Źródło: opracowanie własne

Wyniki badania pozwoliły potwierdzić uzyskane wcześniej rezultaty [33], utwierdzając pozytywny wpływ zastosowanego mechanizmu wektora błędów. W etapie 3. znacząco obniżyła się liczba błędów popełnianych przez uczniów w poszczególnych klasach błędów. Dodatkowo wprowadzone usprawnienia przyspieszyły działanie związane z doborem odpowiednich pytań w zadaniach oraz pozwoliły na większe skupienie uwagi na zagadnieniach problematycznych. Uczniowie bardzo pozytywnie wypowiadali się o pracy z aplikacją oraz o możliwościach samodzielnej nauki, jaką oferuje platforma.

5. Podsumowanie

Na obecnym etapie opisana platforma wspomaga edukację osób niewidomych, ale napotyka ona nawiele wyzwań i ograniczeń w zastosowaniu praktycznym, o których należy wspomnieć. Jednym z nich jest czasochłonność przygotowywania zadań. Obecnie platforma wymaga od nauczyciela większego nakładu pracy niż dotychczas (tradycyjna forma prowadzenia zajęć) ze względu na konieczność przygotowywania grafik na podstawie zadań z podręczników szkolnych. Cały proces związany z dodawaniem opisów alternatywnych do elementów oraz testów na różnych poziomach trudności również wymaga dodatkowego nakładu pracy i czasu nauczyciela. Drugim z ograniczeń, z którymi mierzy się platforma, jest praca nauczyciela z wieloma uczniami jednocześnie. Obecnie rozwiązanie sprawdza się najlepiej w przypadku pracy nadzorowanej z jednym podopiecznym, wymagając tym samym od nauczyciela skupienia uwagi tylko na nim, co w trakcie zajęć nie jest łatwe w realizacji. Rozwiązaniem w tym wypadku jest wprowadzenie modułu monitorującego i wyświetlającego postępy pracy całej klasy, połączonego z możliwością wezwania opiekuna w momencie wystąpienia trudności.

W publikacji przedstawione zostało rozwiązanie wspierające edukację osób niewidomych. Dodatkowo opisane zostały wyniki badań [7, 33], które udało się dotychczas przeprowadzić i opublikować. Całość rozwiązania opiera się na zastosowaniu technologii takich jak aplikacja internetowa, aplikacja mobilna oraz wydruki wypukłe. Dotychczasowa wersja platformy sprawdza się w edukacji osób niewidomych, ale zostały już wytyczone kolejne ścieżki dalszego rozwoju narzędzia. Pierwszym z tych kierunków jest rozbudowanie aplikacji o możliwości pracy w edukacji inkluzyjnej (włączającej). Zakłada ona współpracę uczniów z niepełnosprawnościami z uczniami pełnosprawnymi. Pozwala to na przełamywanie barier związanych z niepewnością i niską samooceną. Problem ten został też już zasygnalizowany powyżej jako ograniczenie związane z praktycznym zastosowaniem platformy. Drugim kierunkiem rozwoju jest adaptacja rozwiązania do potrzeb nauki zdalnej. Dotychczas zaimplementowany i przetestowany został podstawowy moduł komunikacji głosowej za pomocą aplikacji mobilnej. Dalsze prace badawcze skupione są na odwzorowaniu pracy w sali

lekcyjnej, gdzie nauczyciel prowadziłby lekcje, będąc połączonym i mogąc monitorować wszystkich uczniów w klasie jednocześnie. Kolejną z obecnie rozwijanych ścieżek jest rozbudowanie systemu inteligentnej nauki na podstawie kolejnych metod sztucznej inteligencji. Jej głównym celem jest większe wsparcie samodzielnej nauki niż obecnie. Uczeń, pracując z aplikacją, powinien mieć możliwość opanować dany materiał lub nawet cały dział z danego przedmiotu bez pomocy nauczyciela. Ostatnią z rozwijanych ścieżek, będących jednocześnie głównym przedmiotem doktoratu, jest automatyzacja adaptacji materiałów edukacyjnych do formy dotykowo-dźwiękowej. Wśród jej głównych założeń jest zastosowanie metod sztucznej inteligencji do wykrywania obiektów na obrazach, a następnie naniesienie tych obiektów na szkielet pliku SVG. Tak przygotowany obraz powinien zostać półautomatycznie udźwiękowiony z zastosowaniem szerokiej bazy opisów alternatywnych. Pozwoli to na znaczne skrócenie czasu koniecznego na przygotowanie zadania przez nauczyciela. Opisane zagadnienie jest jednym z aktualnych ograniczeń opracowanej platformy, ponieważ nauczyciele często wskazują, że proces adaptacji materiałów do potrzeb osób niewidomych jest bardzo trudny i czasochłonny.

Obecne narzędzie dobrze spełnia swoje zadanie, o czym świadczą badania przytoczone w punkcie 4 oraz w publikacjach [7, 33], ale dalszy rozwój pozwoli na zwiększenie możliwości wykorzystania go w pracy nauczyciela w trakcie zajęć z uczniami i podczas samodzielnej nauki przez ucznia.

Bibliografia

1. Bourne R.R., Steinmetz J.D., Saylan M.: Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the right to sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study: The Lancet Global Health, 9(2), e144-e160, 2021.
2. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment> [dostęp: 3.04.2023].
3. Maćkowski M., Brzoza P., Żabka M.: Multimedia platform for mathematics' interactive learning accessible to blind people. *Multimed Tools Appl* 77, 6191–6208, 2018.
4. Maćkowski M., Brzoza P., Spinczyk D.: Tutoring math platform accessible for visually impaired people. *Computers in Biology and Medicine*; 95:298-306, 2018.
5. Aldrich F., Sheppard L.: Tactile graphics in school education: Perspectives from pupils. *Br. J. Vis. Impair.* 19, 2, 69–73, 2001.
6. Brayda L., Leo F., Baccelliere C., Ferrari E., Vigni C.: Updated Tactile Feedback with a Pin Array Matrix Helps Blind People to Reduce Self-Location Errors. *Micromachines (Basel)*; 9(7):351, 2018.

7. Maćkowski M., Brzoza P., Kawulok M., Meisel R., Spinczyk D.: Multimodal Presentation of Interactive Audio-Tactile Graphics Supporting the Perception of Visual Information by Blind People. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.* Just Accepted, 2023.
8. <https://www.brailleauthority.org/tg/web-manual/index.html> [dostęp: 3.04.2023].
9. Jehoel S., McCallum D., Rowell J., Ungar S.: An empirical approach on the design of tactile maps and diagrams: The cognitive tactualization approach. *British Journal of Visual Impairment*, 24(2), 67–75, 2006.
10. Gori M., Cappagli G., Baud-Bovy G., Finocchietti S.: Shape Perception and Navigation in Blind Adults. *Front Psychol.*; 8:10, 2017.
11. Silva C.S., Wimalaratne P.: Sensor fusion for visually impaired navigation in constrained spaces. 2016 IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), Galle, Sri Lanka 2016.
12. Kristjánsson Á., Moldoveanu A., Jóhannesson Ó.I., Balan O., Spagnol S., Valgeirsdóttir V.V., Unnthorsson R.: Designing sensory-substitution devices: Principles, pitfalls and potential. *Restor Neurol Neurosci.* Sep 21;34(5):769-87, 2017.
13. Way T.P., Barner K.E.: Automatic visual to tactile translation. II. Evaluation of the TACTile image creation system, in *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 95-105, 1997.
14. Krufka S.E., Barner K.E.: Automatic production of tactile graphics from scalable vector graphics. *Proceedings of the 7th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility (Assets '05)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 166–172, 2005.
15. Jayant C., Renzelmann M., Wen D., Krisnandi S., Ladner R., Comden D.: Automated tactile graphics translation: in the field. *Proceedings of the 9th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility (Assets '07)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 75–82, 2007.
16. Ladner R., Ivory M., Rao R., Burgstahler S., Comden D., Hahn S., Renzelmann M., Krisnandi S., Ramasamy M., Slabosky B., Martin A., Lacenski A., Olsen S., Croce D.: Automating tactile graphics translation. *Proceedings of The Seventh International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (Baltimore, MD, Oct 09-Oct 12, 2005)*, 50–57, 2005.
17. Gorlewicz J.L., Tennison J.L., Palani H.P., Giudice N.A.: The Graphical Access Challenge for People with Visual Impairments: Positions and Pathways Forward. *Interactive Multimedia – Multimedia Production and Digital Storytelling*, 2019.
18. Baker C. M., Milne L. R., Scofield J., Bennett C. L., Ladner R. E.: Tactile graphics with a voice: Using QR codes to access text in tactile graphics. *ASSETS14 – Proc. 16th Int. ACM SIGACCESS Conf. Comput. Access.*, 75–82, 2014.

19. Götzelmann T., Winkler K.: SmartTactMaps: A smartphone-based approach to support blind persons in exploring tactile maps. 8th ACM Int. Conf. Pervasive Technol. Relat. to Assist. Environ. PETRA 2015 – Proc., 2015.
20. Baker C.M., Milne L.R., Drapeau R., Scofield J., Bennett C.L., Ladner R.E.: Tactile Graphics with a Voice. *ACM Trans. Access. Comput.* 8, 1, 2016.
21. Brzostek-Pawłowska J.: Multimedia mathematical communication in a diverse group of students. *J. Telecommun. Inf. Technol.* 2, 92–103, 2019.
22. Elgendy M., Guzsvinecz T., Sik-Lanyi C.: Identification of Markers in Challenging Conditions for People with Visual Impairment Using Convolutional Neural Network. *Applied Sciences.*; 9(23):5110, 2019.
23. Mikułowski D., Brzostek-Pawłowska J.: Multi-sensual Augmented Reality in Interactive Accessible Math Tutoring System for Flipped Classroom. *Intelligent Tutoring Systems.*; 12149:1–10, 2020.
24. Garcia Garcia G., Grau R. R., Aldrich F. K., Cheng P. C.: Multi-touch Interaction Data Analysis System (MIDAS) for 2-D tactile display research. *Behav Res Methods.*; 52(2):813-837, 2020.
25. Jain S., Begrajka D., Pathak S.: HCI Guidelines for Designing Website for Blinds. *International Journal of Computer Applications*, 103(11), 29–33, 2014.
26. Maćkowski M., Żabka M., Kempa W., Rojewska K., Spinczyk D.: Computer aided math learning as a tool to assess and increase motivation in learning math by visually impaired students. *Disabil Rehabil Assist Technol.*; 17(5):559-569, 2022.
27. Pearl C.: *Designing voice user interfaces: principles of conversational experiences.* O'Reilly Media Inc, 2016.
28. Metatla O., Oldfield A., Ahmed T., Vafeas A., Miglani S.: Voice User Interfaces in Schools: Co-Designing for Inclusion with Visually-Impaired and Sighted Pupils. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–15, 2019.
29. Oumard C., Kreimeier J., Götzelmann T.: Pardon? An Overview of the Current State and Requirements of Voice User Interfaces for Blind and Visually Impaired Users. *Computers Helping People with Special Needs: 18th International Conference, ICCHP-AAATE 2022, Lecco, Italy, July 11–15, Proceedings, Part I.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 388–398, 2022.
30. Porcheron M., Fischer J. E., Reeves S., Sharples S.: Voice Interfaces in Everyday Life. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 640, 1–12, 2018.
31. Lynch D., Howlin C.P.: Real world usage of an adaptive testing algorithm to uncover latent knowledge. *Proc. ICERI 2014 Conf.*, 504–511, 2014.

32. Maćkowski M., Żabka M., Kempa W., Rojewska K., Spińczyk D.: Computer aided math learning as a tool to assess and increase motivation in learning math by visually impaired students. *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, 2020.
33. Maćkowski M., Brzoza P., Kawulok M., Knura T.: Mobile e-learning platform for audio-tactile graphics presentation. [In:] Miesenberger K., Kouroupetroglou G., Mavrou K., Manduchi R., Covarrubias Rodriguez M., Penáz P., (eds.), *Computers Helping People with Special Needs. 18th International Conference, ICCHP-AAATE 2022, Lecco, Italy, July 11-15, 2022. Proceedings. Pt. 1. T. 13341. Lecture Notes In Computer Science.*; 2022:82–91, 2022.

PLATFORMA EDUKACYJNA DLA OSÓB NIEWIDOMYCH DOSTOSOWANA DO ALTERNATYWNEJ PREZENTACJI GRAFIKI DOTYKOWO-DŹWIĘKOWEJ

Streszczenie

Współcześnie w edukacji bardzo wiele materiałów prezentowanych jest w formie graficznej. Rodzi to niestety problemy dla osób z niepełnosprawnościami wzrokowymi, które mają utrudnione zadanie w przypadku prób przyswajania takich informacji. Popularnym rozwiązaniem stosowanym dotychczas był wydruk wypukły z opisami w brajlu umieszczanymi na rysunku albo drukowanymi na osobnej kartce. Taka forma przekazu sprawdza się w przypadku mniej skomplikowanych zadań, ale w momencie, kiedy trudność i złożoność rosną, przestaje ona spełniać swoje założenia. Z pomocą przychodzą nowoczesne narzędzia takie jak czytniki ekranów czy tablety. Publikacja przedstawia zaprojektowane i wdrożone rozwiązanie wspierające edukację osób niewidomych. Dzięki połączeniu wydruków wypukłych i tabletów z systemem Android udało się stworzyć platformę alternatywnej prezentacji dotykowo-dźwiękowej. Zaimplementowana aplikacja internetowa pozwala na tworzenie nowych zadań i realizację czynności związanych z administracją. Cały system został rozwinięty o podstawowe mechanizmy inteligentnej nauki na podstawie działania wektorów błędu. Pozwala to na monitorowanie postępów i dostosowywanie zadań do poziomu ucznia, co wpływa pozytywnie na proces opanowywania materiału i zapoznawania się z informacjami graficznymi. Platforma znajduje zastosowanie w trakcie tradycyjnych lekcji oraz w procesie samodzielnej nauki.

Słowa kluczowe: grafiki dotykowo-dźwiękowe, inteligentny system nauki, osoby z niepełnosprawnościami, dostępność, interfejsy dotykowe

AN EDUCATIONAL PLATFORM FOR THE BLIND ADAPTED TO THE ALTERNATIVE PRESENTATION OF AUDIO-TACTILE GRAPHICS

Abstract

Nowadays in education a great deal of materials is presented in graphic form. This, unfortunately, raises problems for visually impaired people, who have a difficult task when trying to assimilate such information. A popular solution used so far has been tactile printing with descriptions in braille either placed on the drawing or printed on a separate sheet of paper. This form of materials works well for less complicated tasks, but when the difficulty and complexity increase, it no longer serves its purpose. Modern tools such as screen readers and tablets come to the rescue. This publication presents a designed and implemented solution to support the education of blind people. By combining tactile prints and Android tablets, it was possible to create a platform for alternative audio-tactile presentation. The implemented web application allows for the creation of new exercises and the handling of administrative activities. The whole system has been developed with basic mechanisms for intelligent learning based on the usage of error vectors. This allows to monitor the progress and adjust the task difficulty for the student, which positively affects the process of mastering the material and familiarizing with graphic information. The platform can be used during traditional lessons and in the process of self-study.

Keywords: audio-tactile graphics, intelligent tutoring system, people with disabilities, accessibility, touch interfaces.

Muhammad Jahangir KHAN^{1*}, Amjad IQBAL², Grzegorz MOSKAL³

A SHORT REVIEW ON HOT CORROSION OF THERMAL BARRIER COATING SYSTEMS

1. Introduction

A typical TBC system consists of the substrate, bond coat, and topcoat layers [1, 2]. Nickel-based alloys are preferred as substrates due to their high creep resistance. Due to their ability to promote selective alumina formation, corrosion resistance, and high adhesion, MCrAlY (M = Ni, Co, or a combination of them) alloys are the most suitable overlay coatings for bond coats [3]. TBCs may degrade under service conditions like high-temperature oxidation, hot corrosion, and attack by CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS), thermal shock, and erosion [4, 5].

Thermal barrier coatings (TBCs) are used in high-temperature environments to protect metallic components from thermal and mechanical stresses. However, TBCs are vulnerable to hot corrosion, a complex degradation mechanism that occurs in the presence of corrosive species, such as molten salts, and high-temperature gases [3, 6]. Hot corrosion can lead to the rapid deterioration of TBCs, reducing their protective properties and ultimately leading to component failure [7]. Therefore, understanding the mechanisms and factors contributing to hot corrosion of TBCs is essential for developing effective mitigation strategies and improving the durability and performance of TBCs in harsh environments.

Hot corrosion is a type of accelerated corrosion that occurs at elevated temperatures and is exacerbated by the presence of corrosive contaminants [8]. It is a significant problem in many high-temperature applications, such as gas turbines, aircraft engines, and power generation systems, where metallic components are exposed to hot gases and corrosive species.

¹ Silesian University of Technology, Department of Materials Technologies, 40-019 Katowice, Krasińskiego 8, Poland. E-mail: Muhammad.Jahangir.Khan@polsl.pl

² CEMMPRE – Centre for Mechanical Engineering Materials and Processes, Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Rua Luí's Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal. E-mail: amjad.iqbal@polsl.pl

³ Silesian University of Technology, USTINMAT, 40-019 Katowice, Krasińskiego 8, Poland. E-mail: Grzegorz.Moskal@polsl.pl

* Correspondence: e-mail: Muhammad.Jahangir.Khan@polsl.pl

The mechanisms of hot corrosion are complex and involve the interaction of various factors such as the nature of the contaminant, the composition of the TBC, and the environmental conditions. Typically, hot corrosion occurs through two main mechanisms: high-temperature sulfidation and molten salt attack. High-temperature sulfidation is caused by the reaction between the TBC and sulfur-containing species, while molten salt attack occurs when molten salts react with the TBC surface and penetrate the coating. Hot corrosion of TBCs can lead to several issues, including loss of coating thickness, spallation of the coating, and degradation of the substrate material. The consequences of hot corrosion can be severe and can result in reduced efficiency and reliability of high-temperature components [9, 7 10].

To address the challenges posed by hot corrosion, researchers are working on developing new TBC materials, optimizing coating processes, and implementing corrosion mitigation strategies. These efforts are aimed at improving the durability and performance of TBCs in high-temperature environments and enhancing the safety and reliability of critical high-temperature components.

2. Types of hot corrosion of thermal barrier coatings

There are two types of hot corrosion, type I or high temperature hot corrosion and type II or low temperature hot corrosion. Many factors such as alloy composition, corrosion product, work temperature, alloy type, contaminant composition and flux rate, and gas composition and velocity may affect the devolvement of these two types.

2.1. Type I hot corrosion (HTHC)

This form of hot corrosion, known as high-temperature corrosion, typically occurs between temperature ranges of 850 to 950°C. HTHC is a type of fast oxidation that occurs mostly in the presence of Na_2SO_4 due to its high thermodynamic stability. This type of corrosion starts with the condensation of fused alkali metal salts on the surface of components. These salts initially react with the protective oxide layer and proceed to deplete chromium from substrate. With the depletion of chromium oxidation of substrate materials accelerates and porous scale begins to start. Other types of contamination, either in air or fuel, such as MgSO_4 , CaSO_4 , K_2SO_4 , lead and vanadium, can combine with sodium sulfate to form a salt mixture with a lower melting temperature thus extending the attack's scope. For instance, the addition of V_2O_5 can lower the melting temperature of Na_2SO_4 , which is 884°C, and create a eutectic with a melting temperature of 620°C, increasing the rate of hot corrosion.[11, 12, 13].

2.2. Type II hot corrosion (LTHC)

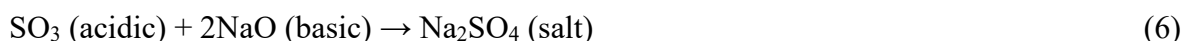
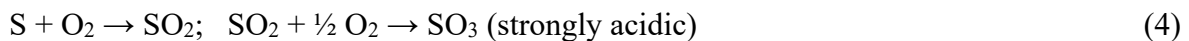
Low temperature hot corrosion (LTHC) occurs within the temperature range of 650-800°C. This type of hot corrosion is commonly observed in marine and industrial gas turbine applications. LTHC produced typical pitting, caused by the formation of mixture of Na₂SO₄ and CoSO₄ with a low melting temperature (melting point of Na₂SO₄-CoSO₄ eutectic is 540°C). CoSO₄ is a corrosion product caused by the reaction between cobalt base super alloy and SO₃ from the combustion gas. Similar to this, it has been suggested that nickel base super alloys form Na₂SO₄-NiSO₄ eutectics. For LTHC high partial pressure SO₃ is required [12, 14].

3. Hot corrosion mechanism

Hot corrosion is a complex degradation process that can occur in thermal barrier coatings (TBCs) when exposed to high-temperature environments containing contaminants. The presence of contaminants such as sodium, sulfur, and vanadium in the hot gas stream can lead to the formation of aggressive species, which can attack the TBC and cause severe degradation. The mechanism of hot corrosion in TBCs can be divided into two stages: the formation of a molten salt layer on the TBC surface, and the penetration of the corrosive scale into the TBC.

Stage 1: Formation of a molten salt layer

The first stage involves the formation of a molten salt layer on the TBC surface, which is typically composed of a mixture of oxides and sulfates. The formation of this layer can occur due to the deposition of contaminants from the hot gas stream, fuel impurities such as Na, S, V, and Ca or due to the reaction of the TBC with the environment. The following chemical reactions can occur during the formation of the molten salt layer [15, 16, 17, 4]:



Sodium sulfate can react with aluminum oxide (Al₂O₃) in the TBC to form sodium aluminate (NaAlO₂) and aluminum sulfate Al₂(SO₄)₃



Vanadium oxide (V₂O₅) can react with sodium sulfate to form sodium vanadate (NaVO₃) and sulfur trioxide



Stage 2: Penetration of the corrosive scale

The second stage involves the penetration of the corrosive scale into the TBC, which can occur via diffusion or by the formation of cracks in the TBC. Sodium sulfate and sodium vanadate can react with the TBC material, such as yttria-stabilized zirconia (YSZ), $Gd_2Zr_2O_7$, $Sm_2Zr_2O_7$ and $Nd_2Zr_2O_7$ to form a complex mixture of oxides sulfates and also leads to phase transformations from (t-m) as shown in table 1. The formation of these oxides and sulfates can cause the TBC to become porous and brittle, leading to cracks and spallation.

Table 1

Corrosion Characteristics of YSZ, $Gd_2Zr_2O_7$ and $La_2Zr_2O_7$ in the presence of molten salt [4, 15]

TBC materials	Corrosive Substance	Corrosion Product
YSZ	Na_2SO_4, V_2O_5	m-ZrO ₂ , YVO ₄ , Y ₂ O ₃
$Gd_2Zr_2O_7$	$Na_2SO_4, V_2O_5, Ca_2SO_4, MgSO_4$	m-ZrO ₂ , GdVO ₄ , Gd ₂ (SO ₄) ₃ Gd ₂ O ₂ SO ₄ , Gd ₂ O ₃
$La_2Zr_2O_7$	$Na_2SO_4, V_2O_5, Ca_2SO_4, MgSO_4$	m-ZrO ₂ , LaVO ₄ , La ₂ (SO ₄) ₃ La ₂ O ₂ SO ₄ , La ₂ O ₃

4. Different type of thermal barrier coatings materials

The durability and performance of coating materials depends on their high hot corrosion resistance; the first ceramic layer for TBCs was made in the late 1970s from ZrO₂ stabilized with 7-8 weight percent Y₂O₃ (YSZ). Because of its high linear TEC ($9.2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ at 1000°C), low thermal conductivity (2.1 W/m K between 1000 and 1200°C), and thermochemical compatibility with Al₂O₃ due to the oxidation of the metallic oxidation-resistant layer, yttria-stabilized zirconia is universally recognized as the TBC material. But YSZ is restricted to applications below 1200°C [18]. Above that temperature, diffusion-less phase transformation from the metastable tetragonal (t') phase to the tetragonal (t) and cubic (c) phases takes place. During cooling, this tetragonal phase changes into a monoclinic phase with a significant volume change, and this phenomenon severely damages the coating [19]. Sintering above 1200°C causes the coating's porosity to decrease, and thermally induced stresses are created. These stresses result in a greater chance of failure for the YSZ-based TBC.

Both the hot corrosion caused by the presence of Na₂SO₄ and V₂O₅ salts from low-quality jet fuel and the Ca-Mg-Al-Silicate (CMAS) attack brought on by flying ash can easily and significantly damage YSZ [17]. Both of them result in the coating's deterioration and spallation. In order to create next-generation turbine engines, a different ceramic topcoat material with

significantly better thermal properties than YSZ should be developed. Currently, there are two main strategies for creating new materials for the TBC upper ceramic layer [20]. One strategy concentrates on YSZ doped with a single or multiple rare-earth metal oxides (REM oxides). The second deals with REM zirconates that have a pyrochlore structure and are phase stable up to their melting point. Among TBC's materials, $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{lanthanide}$) is the most promising [21].

In the temperature range from room temperature to 1400°C , the thermal conductivities of rare-earth zirconates ranged from 1.1 to $2.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Rare-earth zirconates have clearly higher phase transition temperatures than YSZ, with $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ phase transition temperature being 2310°C , $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ phase transition temperature being 2000°C , and $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ phase transition temperature being 1500°C , respectively [18]. In comparison to YSZ, these materials have higher melting points, higher stability, lower thermal conductivity, higher thermal expansion coefficients (TEC), and lower thermal conductivity. The hot corrosion resistance of $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ and double layer coatings such as $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, $\text{YSZ}/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ is much better than that of YSZ in the presence of liquid sulphate salts [15]. The general properties and characteristics of YSZ, $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ and $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ are summarized in Table 2.

Table 2

Thermal physical properties of potential TC materials [22, 23]

Materials	Operation temperature/K	Thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Thermal expansion coefficient/ 10^{-6}K^{-1}	Advantages	Disadvantages
YSZ	1473	2.2	11.5	High thermal shock resistance; high thermal expansion Coefficient.	Sintering and phase transformation(1473 K); corrosion; oxygen transparent Relatively low thermal expansion coefficient
$\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	1773	1.2	10.5	Low thermal conductivity;	
$\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	2573	1.6	9.1	sintering; high thermal stability;	
$\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	2583	1.3	9.6	not oxygen transparent	
$\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	2273	1.5	10.8		

Doleker, K. M. investigated yttria-stabilized zirconia (YSZ) and $\text{YSZ}/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ and found that presence of 30% NaCl salt in the corrosion clouds of dust caused the TBC systems to be damaged quite early and as corrosion products, NaAlO_2 and Na_2CrO_4 products were formed in addition to YVO_4 , GdVO_4 , and m-ZrO_2 . In the hot corrosion tests, $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, which is the top layer in the TBC system with $\text{YSZ}/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ content, was the first layer to react with corrosion salts. This layer sacrificed itself and reduced the damage to the YSZ layer. Thus, during

the prolonged corrosion process, the resistance of the TBC system with YSZ/Gd₂Zr₂O₇ content against hot corrosion was better than the TBC system with YSZ content [6].

Moskal G. investigated the dual-phase of Sm₂Zr₂O₇ + 8YSZ and noted the basic NaSmO₂ and acidic Zr(SO₄)₂ compounds that reacted to form fluorite-type samarium zirconate. Due to the fluxing mechanism described by Rapp, the voids close to the fluorite phase are rich in aluminum. The presence of Ti-S is due to direct sulfate transport into the substrate, the most interesting phenomenon is the mutual interaction between YSZ and SmZO [4].

Basil R. investigated Lanthanum zirconate and partially stabilized zirconia and observed that in the presence of V₂O₅ and salt solution (containing sulfate salts in a mole ratio of 3Na₂SO₄:2MgSO₄) and found the different hot corrosion behavior of two materials, 8YSZ rapidly degraded by the vanadium compounds and resistant to attack by the sulfur materials while the lanthanum zirconate was less damaged by exposure to V₂O₅ but severely attacked in the presence of sulfur containing species [24].

Praveen, K. Investigated Hot corrosion behavior of hybrid double-layered LZ/LZC + YSZ thermal barrier coatings Corrosive salt Na₂SO₄+V₂O₅ interaction with YSZ coatings results in YVO₄ as the primary corrosive product along with monoclinic phase transformation of ZrO₂. LZ coatings form LaVO₄ as the primary corrosive product along with zirconia and LZC coatings form (LaCe)VO₄ as the primary corrosive product along with ZrO₂. In both double-layered LZ/LZC + YSZ architectures, the underlying YSZ remained unaffected by the molten corrosive salts after 30 h. LZ and LZC coatings act as the sacrificial as well as resisting layer against molten salt corrosion. Thus, the double-layered coatings potentially improve performance over the standalone YSZ system [25].

D. Migas et al. investigate the corrosion mechanism in the dual-phase Nd₂Zr₂O₇ YSZ system. He suggested that, in the case of Nd₂Zr₂O₇-8YSZ, the chemical interactions between the harsh environment and the ceramic topcoat were typically limited. The single-phase Nd₂Zr₂O₇ topcoat on the FGS TBC system demonstrated high resistance to molten deposits of pure Na₂SO₄ at high temperatures. NdCrO₃ and Nd₂(SO₄)₃ were the corrosion products that were found. Two-phase systems had more complex hot corrosion behavior. The formation of sulfate compounds was not observed in these coatings, and the degradation processes were based on the production of neodymium zirconates with a fluorite structure (e.g., Nd_{0.2}Zr_{0.8}O_{1.9} and Nd_{0.5}Zr_{0.5}O_{1.75}). The presence of sodium sulfate promotes the diffusional breakdown of pyrochlore-structured phases [8].

5. Conclusion

In conclusion, the hot corrosion of thermal barrier coatings remains a significant challenge in the aerospace and power generation industries. The mechanism of hot corrosion is complex, involving a combination of high-temperature oxidation and molten salt attack. Different types

of hot corrosion, including Type I, and Type II, can affect the performance and service life of thermal barrier coatings. To minimize hot corrosion, various materials, such as yttria-stabilized zirconia, rare earth oxides, and ceria-zirconia, have been used as thermal barrier coatings. However, there is still a need for further research to develop more effective coatings and understand the underlying mechanisms of hot corrosion. Overall, this review paper provides a short overview of hot corrosion of thermal barrier coatings, highlighting the importance of continued research in this field to improve the performance and durability of these coatings in harsh environments.

References

1. Moskal G. Thermal barrier coatings: Part 1 – characteristics of microstructure and properties, generation and directions of development of bond. *Arch. Mater. Sci.* **28**, 100–112 (2007).
2. Bahamirian M. & Khameneh Asl S. An investigation on effect of bond coat replacement on hot corrosion properties of thermal barrier coatings. *Iran. J. Mater. Sci. Eng.* **10**, 12–21 (2013).
3. Keyvani A., Saremi M. & Sohi M.H. An investigation on oxidation, hot corrosion and mechanical properties of plasma-sprayed conventional and nanostructured YSZ coatings. *Surf. Coatings Technol.* **206**, 208–216 (2011).
4. Moskal G., Jucha S., Mikuškiewicz M., Migas D. & Jasik A. Atypical decomposition processes of Sm₂Zr₂O₇ + 8YSZ dual-phase TBCs during hot corrosion. *Corros. Sci.* **170**, 108681 (2020).
5. Bahamirian M., Hadavi S.M.M., Farvizi M., Rahimpour M.R. & Keyvani A. Enhancement of hot corrosion resistance of thermal barrier coatings by using nanostructured Gd₂Zr₂O₇ coating. *Surf. Coatings Technol.* **360**, 1–12 (2019).
6. Jones R.L. *et al.* Oxidation and hot corrosion resistance of HVOF/EB-PVD thermal barrier coating system. *Surf. Coatings Technol.* **23**, 1–10 (2016).
7. Holländer, C. *et al.* Hot corrosion of TBC - coated components upon combustion of low – sulfur fuels. (2021) doi:10.1002/maco.202112371.
8. Migas D., Moskal G. & Jucha S. Hot corrosion behavior of double-phase Nd₂Zr₂O₇-YSZ thermal barrier coatings. *Surf. Coatings Technol.* **449**, 128955 (2022).
9. Park S.Y., Kim J.H., Kim M.C., Song H.S. & Park C.G. Microscopic observation of degradation behavior in yttria and ceria stabilized zirconia thermal barrier coatings under hot corrosion. *Surf. Coatings Technol.* **190**, 357–365 (2005).
10. Kumar V. & Balasubramanian K. Progress update on failure mechanisms of advanced thermal barrier coatings : A review Progress in Organic Coatings Progress update on failure mechanisms of advanced thermal barrier coatings : A review. *Prog. Org. Coatings* **90**, 54–82 (2016).

11. Shifler D.A. The increasing complexity of hot corrosion. ASME. *J. Eng. Gas Turbines Power*. (2017). DOI:10.1115/1.4038037.
12. Song J. *et al.* The Gd₂Zr₂O₇-Based Materials for Thermal Barrier Coatings. *Prog. Org. Coatings* **13**, 498–512 (2020).
13. Iqbal A., Khan. J., & Moskal G. A review on the degradation of coating under hot corrosion process. COATEMPORARY PROBLEMS OF POWER ENGINEERING AND ENVIRNMENTAL PROTECTION 2022,27.
14. Task M.N., Gleeson B.M., Pettit F. & Meier G. The Effect of Microstructure on the Type II Hot Corrosion of Ni-Base MCrAlY Alloys The Effect of Microstructure on the Type II Hot Corrosion of Ni-Base MCrAlY Alloys. (2013) doi:10.1007/s11085-013-9405-z.
15. Ozgurluk Y., Doleker K.M., Ahlatci H. & Karaoglanli A.C. Investigation of hot corrosion behavior of thermal barrier coating (TBC) systems with rare earth contents. *Arab. J. Geosci.* **11**, 2017–2019 (2018).
16. Xu Z. *et al.* Hot corrosion behavior of rare earth zirconates and yttria partially stabilized zirconia thermal barrier coatings. *Surf. Coatings Technol.* **204**, 3652–3661 (2010).
17. Habibi M.H., Wang L. & Guo S.M. Evolution of hot corrosion resistance of YSZ, Gd₂Zr₂O₇, and Gd₂Zr₂O₇+YSZ composite thermal barrier coatings in Na₂SO₄+V₂O₅ at 1050°C. *J. Eur. Ceram. Soc.* **32**, 1635–1642 (2012).
18. Liu Z.G., Ouyang J.H., Zhou Y. & Li S. High-temperature hot corrosion behavior of gadolinium zirconate by vanadium pentoxide and sodium sulfate in air. *J. Eur. Ceram. Soc.* **30**, 2707–2713 (2010).
19. Singh J. *et al.* We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %. *Intech* **11**, 13 (2016).
20. Xu Z. *et al.* Effect of Cracks on Thermal Shock Behavior of Plasma-Sprayed Thick Thermal Barrier Coatings. *J. Therm. Spray Technol.* **26**, 13 (2017).
21. Zhang J., Guo X., Jung Y.G., Li L. & Knapp J. Lanthanum zirconate based thermal barrier coatings: A review. *Surf. Coatings Technol.* **323**, 18–29 (2017).
22. Chen H.F. *et al.* Recent progress in thermal/environmental barrier coatings and their corrosion resistance. *Rare Met.* **39**, 498–512 (2020).
23. Bakan E. & Vaßen R. Ceramic Top Coats of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: Materials, Processes, and Properties. *J. Therm. Spray Technol.* **26**, 992–1010 (2017).
24. Marple B.R., Voyer J., Thibodeau, M., Nagy, D. R. & Vassen, R. Hot corrosion of lanthanum zirconate and partially stabilized zirconia thermal barrier coatings. *J. Eng. Gas Turbines Power* **128**, 144–152 (2006).
25. Praveen K., Alroy R.J., Rao D.S. & Sivakumar G. Surface & Coatings Technology Hot corrosion behavior of hybrid double-layered LZ / LZC + YSZ thermal barrier coatings made using powder and solution precursor feedstock. *Surf. Coat. Technol.* **436**, 128260 (2022).

A SHORT REVIEW ON HOT CORROSION OF THERMAL BARRIER COATING SYSTEMS

Abstract

This review paper discusses the hot corrosion of thermal barrier coatings, including the different types of hot corrosion, the mechanism behind it, and the various materials used to minimize its effects. Hot corrosion remains a significant challenge in the aerospace and power generation industries due to the complex nature of the mechanism. Yttria-stabilized zirconia, rare earth oxides, and ceria-zirconia have been used as thermal barrier coatings to mitigate hot corrosion. However, further research is needed to develop more effective coatings and understand the underlying mechanisms. This paper provides an overview of hot corrosion of thermal barrier coatings and emphasizes the need for continued research in this area.

Keywords: hot corrosion, thermal barrier coatings, gas turbines, degradation mechanism, sulfates, chlorides, corrosion products, microstructure, sacrificial layer

KRÓTKI PRZEGLĄD NA TEMAT KOROZJI NA GORĄCO SYSTEMÓW POWŁOK Z BARIERĄ TERMICZNĄ

Streszczenie

Artykuł ma charakter przeglądowy. W jego treści omówiono korozję na gorąco powłok termoizolacyjnych, w tym różne rodzaje korozji na gorąco, jej mechanizm oraz materiały stosowane w celu zminimalizowania jej skutków. Korozja na gorąco pozostaje poważnym wyzwaniem w przemyśle lotniczym i energetycznym ze względu na złożony charakter jej mechanizmu. Cyrkon stabilizowany tlenkiem itru, tlenki pierwiastków ziem rzadkich i cerowo-tlenek cyrkonu były stosowane jako powłoki bariery termicznej w celu złagodzenia omawianej korozji. Niezbędne są dalsze badania, aby opracować skuteczniejsze powłoki i zrozumieć leżące u ich podstaw mechanizmy.

Słowa kluczowe: korozja na gorąco, powłoki termoizolacyjne, turbiny gazowe, mechanizm degradacji, siarczany, chlorki, produkty korozji, mikrostruktura, warstwa protektorowa

Benard KIPSANG¹, Krzysztof WACŁAWIAK²

FRACTURE TOUGHNESS TEST METHODS AND SPECIMENS: A COMPARATIVE REVIEW OF RECENT PROGRES

Nomenclature

a	Crack depth
B	Specimen thickness
W	Specimen width
CMOD	Crack mouth opening displacement
CTOD	Crack tip opening displacement
CTOA	Crack-Tip Opening Angle
LEFM	Linear Elastic Fracture Mechanics
EPFM	Elastic-Plastic Fracture Mechanics
J	J- integral
η	η -factor
SEN(T)	Single-edge notched tension
C(T)	Compact tension
K	Stress intensity factor
G	The elastic energy release rate
DENT	Double End Notch Tension
DCPD	Direct current Potential Drop
SEN(B)	Single Edge Bend
FEA	Finite Element Analysis
FGC	Fatigue crack growth
Δa_{max}	Maximum crack growth
HAZ	Heat affected zone
CCB	Circumferentially cracked bar
δ_{Ti}	Subcritical crack initiation/ at 0.2 mm
δ_{TC}	subcritical crack extension
FS(T)	Full-scale test
CWP(T)	Curved-wide plate test
ASTM	American Society for Testing and Materials
LLD	Load Line-Displacement
Q	Constrain Parameter for J-Q theory

¹ Department of Materials Technologies, Faculty of Materials Engineering, Silesian University of Technology, Katowice, Poland.

² Department of Materials Technologies, Faculty of Materials Engineering, Silesian University of Technology, Katowice, Poland.

1. Introduction

Griffith's pioneering work established the concept of toughness as a measure of fracture resistance [1]. In the second half of the twentieth century, it became an essential tool in developing advanced structures [2, 3]. Its literature is currently extensive [4, 5]. An accurate determination of fracture toughness is critical for assessing equipment failure. Early fracture assessments relied on the energy approach, which defined fracture as occurring when the energy available for crack growth is sufficient to overcome the material's resistance [6].

Although fracture toughness tests are mostly carried out according to BSI and ASTM standards [1] Estimates of K_{IC} or J_{IC} based on empirical correlations with classical Charpy impact tests are still popular and frequently preferred [7]. This is because standard toughness testing procedures are much more demanding than the Charpy. Fracture toughness measurement and standardization are critical in applying fracture mechanics techniques to structural soundness analysis, damage tolerance design, fitness-for-service evaluation, and residual strength analysis [6]. Table 1 provides the division of various fields of fracture mechanics.

Table 1

A simplified table for the field of fracture mechanics

Category	Material Property	Parameter
Linear Elastic Fracture Mechanics	Linear, time-independent	K, G
Elastic-Plastic Fracture Mechanics	Non-linear, time-independent	J- Integral, CTOD

Many reviews have been done but studies that focus on only recent advances are rare. Motivated by these observations, this paper review the incremental advances made in the last two decades in fracture mechanics. It summarizes recent improvements in fracture toughness testing and standardization. It is expected to serve as guide in impleme ation of proper fracture parameters and fracture toughness test methods, and future fracture test standard improvement. The testing methods for materials in low-constrain conditions is presented. SEN(are specimen test method progress is discussed and compared. The fracture toughness testing of nonconventional geometries, sizes and materials is, discussed. It includes a thorough literature review, allowing the reader to locate critical issues directly from the sources.

2. Advancements in standardization

2.1. Advancements in accuracy and reliability of standards

There are various testing standards in use today, ASTM E1820 and ISO 12135 are two of the most widely used standards[3]. Because of obvious differences between the ASTM and ISO standards, namely the blunting line equation, fitting equation of the J-R curve, and valid data points the results of the two standards will always be different. As a result, it is still unclear which fracture toughness test standard is more useful for particular under certain conditions in technical applications[8]. In [7] the use of standardized C rpy-type specimen with a deep EDM-cut as a notch is suggested. Such a standard would significantly simplify the assessment of fracture toughness.

Zhang et al. [1] compared the J_{IC} values calculated using the ISO and ASTM standards. Their variations were primarily due to the range of qualified data, the function of the construction line, and the regression line equation. These disparities lead to different fracture toughness values with the one tested using ISO standard lower.

2.2. Fracture toughness testing Standards employing SEN(T) specimens

The geometry of the SEN(T) specimen has been found to have closer resemblance e of crack tip constrains to flaconstraints than of other specimens [9]. In the year 2014 the BS 8571 standard [10] was published as a test method employing SEN(T) specimen. Currently its the only stait'srd that incoparates SEN(T) specimen. It elaborates the uses of CTODon and J-integral fracture parameters. The CTOD can be measured directly from the mouth of the specimen or estimated from Clip gauge extena someter. It uses standardized specimens as shown below in Figure 1, the specimen can be loaded by either clamping or pins.

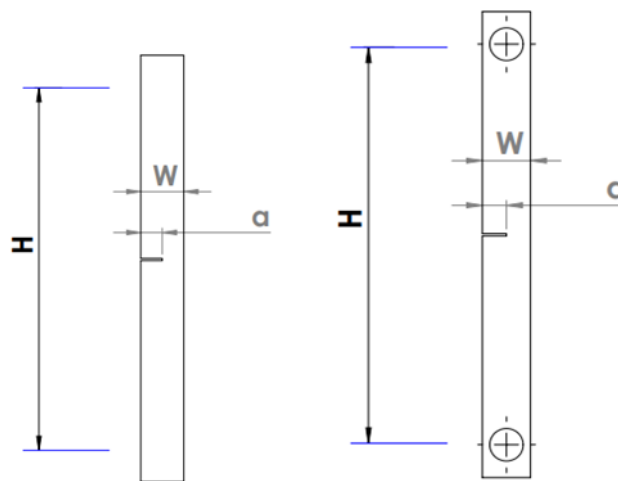


Fig. 1. Clamped and pin-loaded SEN(T) specimens (as described in [10])

Rys. 1. Zaciśnięte i obciążone sworzniem próbki SEN(T) (zgodnie z opisem w [10])

2.3. Advancements in Specimens' configurations

Fracture toughness is popularly measured using high-constraint specimens specified by ASTM [11] and ISO [12], [5] standards. This produce conservative values of fracture toughness especially on pipes which might contain faults related to low-constraint increasing design cost unnecessarily [12]. CCB specimens has been have been suggested [13] to mitigate this. Due to its radial symmetry, which is elementary in design, it can be scaled according to the availability of materials, and is free of three-dimensional effects. Wang et al. [14] provided the following K_I equation for V-notched circumferentially cracked bar under remote tension.

$$K_I = \frac{0.932P\sqrt{D}}{d^2\sqrt{\pi}} \text{ for } 1.2 \leq \frac{D}{d} \leq 2.1 \quad (1)$$

P is the maximum load, d is the minimum diameter at notch, and D is the bar diameter.

3. Advancements in refining fracture toughness testing parameters and formulas

3.1. Recent developments in KIC testing, KJc concept and cleavage fracture

Early fracture assessments relied on the energy approach, which defined fracture as occurring when the energy available for crack growth is sufficient to overcome the material's resistance [6]. Wallin [15] proposed a master curve method with a corresponding reference temperature based on the weakest link theory and the Weibull statistics theory to describe the statistical [16]. K_{JC} derived from J_C is calculated by the following formula.

$$K_{JC} = \sqrt{\left(\frac{EJ_C}{1-\nu^2}\right)} \quad (2)$$

where J_C is using ASTM E1820 technique under circumstances of plane strain.

3.2. J and CTOD estimations for clamped SENT specimens

E. Wang et al. [14] compared methods for computing J and CTOD and proposed a complementary plastic η factor (η_{pl}) which is affected by dimension ratios. The absolute error in this new method was reduced to less than 10%. This approach is a useful and accurate method for predicting η_{pl} values for clamped SEN(T) specimens with $0.3 \leq a/W \leq 0.7$ and $B/W = 1$ and 2.

The current method of construction of J integral curve is complex and requires a detailed computer program or spreadsheet. B.P. Pherson [17] proposed a simpler, less complicated way to obtain J_{IC} . He reported that specimen's load and displacement record can be used to estimate a J_Q value, a provisional value for fracture toughness, J_{IC} .

G.H. Donato et al. [18] proposed creation of J and CTOD estimate algorithms based on eta factors and plastic rotation factors for deep and shallow cracked specimens. Two methods are considered: (i) estimating J and CTOD from plastic work, and (ii) estimating CTOD from the rotational factor.

The plastic component of J integral J_{pl} , is conveniently evaluated from the plastic area under the load-displacement curve as:

$$J_{pl} = \frac{\eta_j A_{pl}}{B(W-a)} \quad (3)$$

When the CTOD is used to describe the material's fracture resistance, a comparable formulation also holds. Then, experimental δ_{pl} of CTOD levels are assessed by:

$$\delta_{pl} = \frac{\eta_\delta A_{pl}}{B6f(W-a)} \quad (4)$$

η_δ factor is a nondimensional parameter describing the effect of plastic strain energy on the applied CTOD. The findings presented here are like those described by Kirk and Dodds [19].

Stretch zone width (Δs_{zw}) can be used to calculate CTOD value δ_{Ti} at subcritical crack initiation,. First proposed by Japanese scholars it was later standardized in the ISO standard.

Furmańczyk et al. [19] evaluated various methods capability to determine the value of CTOD at δ_{Ti} . Table 2 lists the CTOD critical values obtained using various techniques.

Table 2

The average critical levels of δ_{Ti} obtained using various test techniques (based on [19])

Temperature, K	δ_{Ti} , μm					δ_{TC} , μm
	Shih	Hirox_1.5	SEM_1.5	MES_1.5	MES_6.0	ASTM_all
293	220	227	250	261	231	197
223	-	74	101	100	86	158
193	-	22	35	39	36	43

The obtained results are not consistent but somewhat random. These variations are the result of different procedures for determining CTOD critical values. The use of the FEM method and numerical simulation for δ_{Ti} evaluation appears to be the most promising. The FEM allows the calculation of δ_{Ti} at each point along a crack profile. The disadvantages of FEM methods of δ_{Ti} calculation are some modeling simplifications. The ASTM E1820 standard provides a procedure for estimating CTOD at 0.2 mm δ_{TC} based on crack mouth displacement data representing an average value along specimen thickness.

4. Advancements in factors affecting the value of fracture toughness

4.1. Crack Tip constrain

Specimen geometry and forces mode influence the degree of crack tip constraint [5]. Lowering the constraint increases fracture toughness, and vice versa [9]. M. Graba [20] reported that in-plane geometric constraints represented by Q-stresses on the crack tip opening displacement for SEN(B) specimens subjected to primarily plane strain conditions affect toughness values.

In [21] a solution for determining fracture parameters dominated by plane strain is proposed. The influence of material properties fracture toughness and the displacement of the point of application of the force v_{LL} , is determined. New hybrid formulas are presented that enable estimation of EPFM parameters with varying degrees of accuracy with actual experimental data.

J. Kowalski [22] presented the effect of specimen geometry on the CTOD value. The presented findings indicate that specimen cross-section geometry significantly affects CTOD. J. Kang et al. [23] established that different specimen geometries have different crack tip constrains as shown in figure 3.

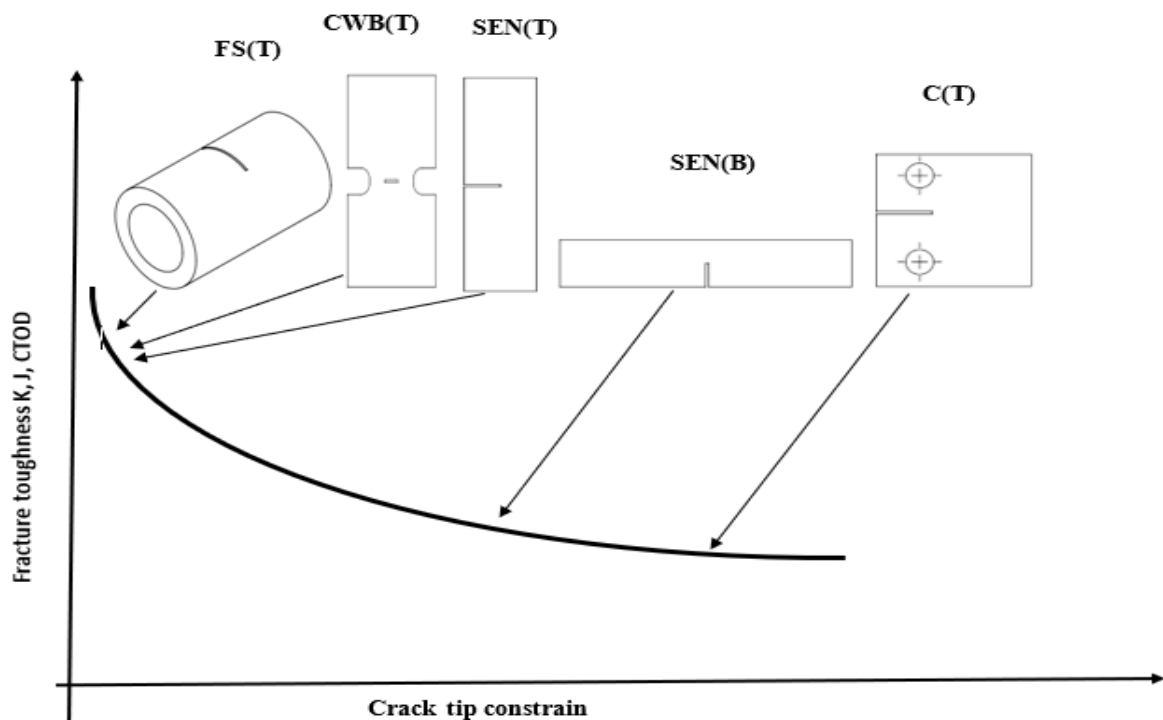


Fig. 2. Diagrammatic representation of the relationship between specimen geometry and fracture toughness and constraint (based on [23])

Rys. 2. Schematyczne przedstawienie zależności między geometrią próbki a odpornością na pękanie i ograniczeniem (na podstawie [23])

4.2. Effect of strain rate on ductile fracture

W.K. Nowacki et al. reported the effect of strain rate on ductile fracture [24]. A new methodology for assessing the influence of strain rate on ductile fracture was proposed. The recording of temperature evolution during deformation can provide additional information for determining the shear banding contribution function and the onset of ductile fracture. In [25] the impact of strain rate and stress triaxiality on the fracture properties of ductile metals was presented. The degree of stress triaxiality in the specimen has a significant impact on the ductility of materials.

5. Advancements in Fatigue crack growth testing

5.1. Fatigue crack growth

Fatigue is arguably the most successful use of fracture mechanics [4]. A structural component's fatigue life is typically divided into two periods: crack initiation and crack growth. The fracture mechanics parameters K , J -integral, and CTOD are considered a crack driving factors for the prediction of fatigue crack propagation. According to Ž. Božić et al. [26] the stages in fatigue crack growth can be represented by the schematic diagram shown in Figure 3.

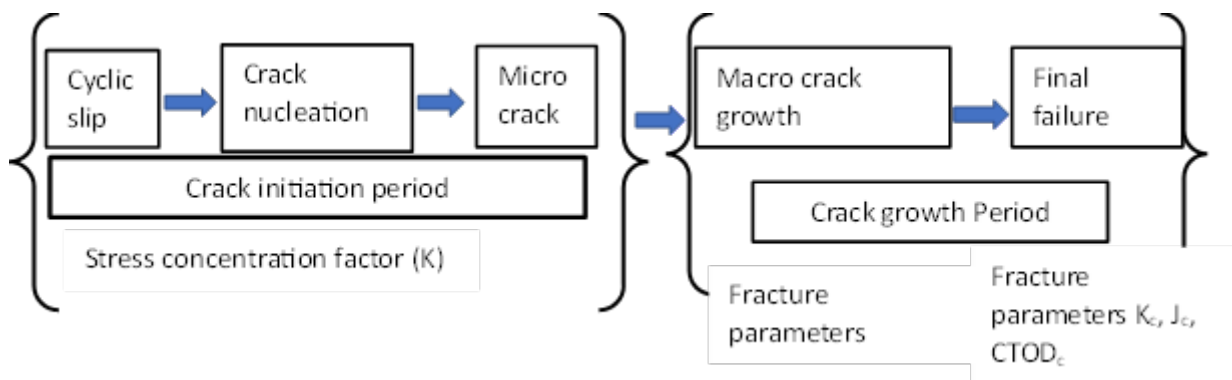


Fig. 3. Stages in the fatigue life (based on [26])

Rys. 3. Etapy trwałości zmęczeniowej (na podstawie [26])

The FEM is the most widely used computational method for calculating K_I [27]. Despite their success in simulation of mixed-mode FGC in complex geometries, they have a disadvantage of need to conform to the geometry of the crack. As a result, each time the crack propagates, the mesh must be updated for each crack increment, which is difficult. K. Hectors et al. [27] presented a Python-based numerical framework for arbitrary three-dimensional fatigue crack propagation using the X-FEM method to solve this. To determine the K_I solutions, the framework employs the Abaqus X-FEM solver. The crack advancement is simulated iteratively using a predefined Δa_{max} .

5.2. Monitoring of crack size

Clip gauges are the most popular, simple, and affordable option for measuring the length of cracks [5]. Other popular method is based on optical measurement [28]. Boroski et al. [28] presented a new method for determining fatigue crack size, called Fatigue VIEW system. It consists of two video cameras and a software. The two cameras enable 3D analyses hence improved accuracy. A fatigue crack is detected in the specimen using a digital image correlation method, and its length monitored as a function of the number of load cycles. This method allows control for fatigue tests with crack lengths, such as stopping the variable loading after the crack reach a specified size.

Monitoring crack extension at sub zero and elevated temperature, is a challenge in FCG [23]. The optical method for measuring crack length can be used to calibrate the compliance method for measuring crack length in cryogenic conditions.

S. Naib et al. [23] compared available techniques for measuring crack growth and tearing behavior. The mob9-point, DCPD, and normalization data reduction techniques were used to measure crack growth. DCPD was found to be a reliable technique for measuring crack sizes in heterogeneous region because it indicates variations in resistance curves and is also an effective method for predicting final crack extension. A minimum distance between the current input and output pins and the notched section is proposed to promote current homogeneity. While simpler to use, the NDR method does not reveal the irregular shape of tearing resistance curves seen in heterogeneous welds.

5.3. Fatigue crack growth standards

In 2015 ASTM published a standard for determining FCG rates from near-threshold to K_{max} controlled instability [29]. To determine the crack growth rate, the crack's size is measured as a function of the number of fatigue cycles, either visually or through an equivalent approach. Results are stated in the linear elasticity theory's crack-tip stress-intensity factor range (K). Materials that can be tested using this test method are not restricted by thickness or strength.

6. Advancements testing of unique materials shapes, geometries and advanced materials

6.1. Fracture toughness of welds

The fracture resistance of weld metal is crucial for structural integrity analysis of load-bearing welded components. The presence of local strength and toughness variations (heterogeneity) within a weld region complicates the assessment of welded structure [30].

The J-R curve for welded joints is determined experimentally by testing small, specimens according to ISO practices. The calculation of crack driving force and extension as the test progresses is required for post-processing of test results. This is based on the ASTM standard [11] for J-evaluation for homogeneous materials, which has been extended to weldments with yield strength mismatch ratios M in the range of 0.5 to M to 1.25. Here, M is described as:

$$M = \frac{\sigma_{yWM}}{\sigma_{yBM}} \quad (5)$$

where σ_{yWM} and σ_{yBM} are the tensile strengths of weld metal and base metal, respectively.

Conventional procedures use specimens with ($a_0/W \geq 0.5$) to assess toughness of weldments [31]. In welded joints, the notch must be in a way that the crack grows through the microstructure of interest [5]. Several reliable methods are available for testing homogeneous materials. However, published data suggest that the accuracy of these methods may degrade when testing welded joints.

Most brittle regions are located at the HAZ, some suitable options for assessing these regions exist, such as joints with "V" or "K" shapes, where one of the sides is perpendicular to the plate surface. The HAZ could be evaluated using compact miniaturized specimens for both "V" symmetrical shapes and K shapes, as shown in the schematic weld joint cross view in Figure 3.

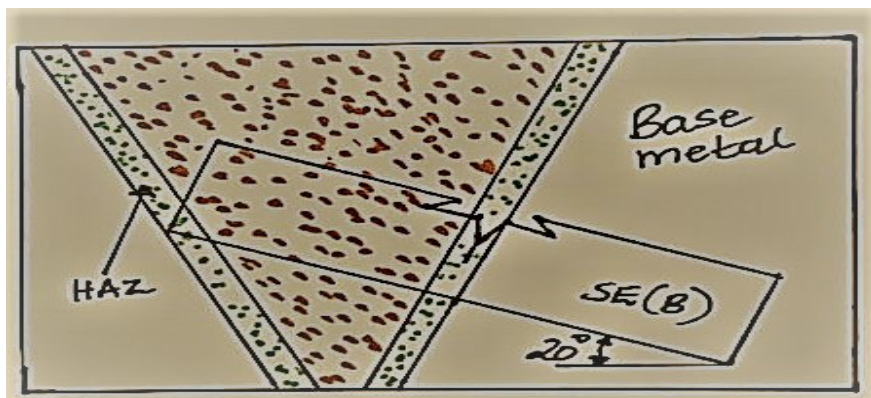


Fig. 4. Design options for notches in fusion weld joints, SE(B) specimens (based on [5])
Rys. 4. Warianty projektowania karków w złączach spawanych, próbki SE(B) (na podstawie [5])

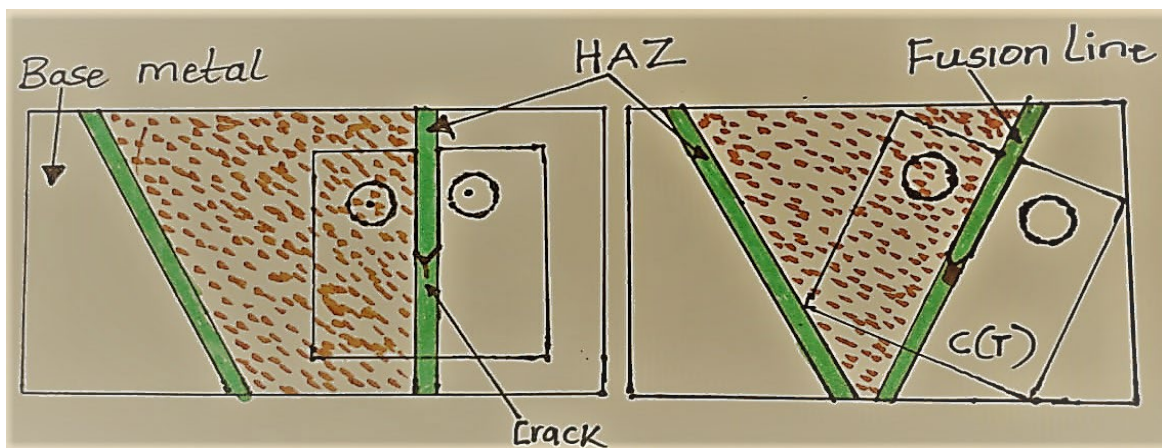


Fig. 5. Design options for notches in fusion weld joints in CT specimen (based on [5])
Rys. 5. Warianty projektowania karków w złączach spawanych w próbce CT (na podstawie [5])

R.G. Savioli et al. [31] examined the use of η methodology and suggested improvements in J and CTOD estimation formulas for C(T) specimens, including overmatched weldments. They introduced a broader set of η factors applicable to wide range of crack sizes (a_0/W) ratio).

6.2. Advances in Fracture toughness for Pipes and pressure vessels

Because of the safety requirements imposed by respective codes, the design of pipes is strictly regulated [32]. The specified vessel wall thickness is determined so that the stresses created in the structure remain within the elastic limit for the design pressure and design temperature. This avoids excessive plastic deformations or ruptures when the yield point exceeds a certain threshold. In 2006 Det Norske Veritas published recommended practice in fracture control for pipeline subjected to cyclic plastic strain [33].

Studies found that the SEN(T) specimen provide a reasonable match to the constraint conditions of a circumferential crack in a pipe under strain-based design conditions [34]. Due to this SEN(T) specimens have been selected to characterize the fracture toughness for pipeline.

Modern steels are becoming increasingly tough hence K_{IC} cannot be used to characterize fracture, instead EPFM is applied represented by CTOD or J-integral as a function of the ductile crack extension of Δa , in mm [12], [34]. Of the two parameters CTOD have been used the most [5]. Promising results on the feasibility of spirally welded pipes to be used in a strain-based design context have been reported in [35].

6.3. Fracture toughness evaluation at the micro-scale and for Miniaturized Specimens

It is challenging to measure a valid K_{IC} because of the strict size criteria of ASTM E 399 [34]. Active research is being done on interface fracture and nanoscale fracture due to issues faced in the microelectronics industry [3]. J. Ast et al. [2] summarized the approaches proposed to address the challenges mentioned above, focusing on micro-cantilever and micro-pillar test configurations. Two toughness evaluation methods had been developed for this micro-level. Micro-pillar splitting and micro-cantilever bending. The small punch (SP) technique was proposed for radiation embrittlement studies in 1981. Many researchers extensively developed this technique to estimate the potential for residual life assessment of components during service [1].

6.4. Brittle fracture criteria for bi-material structures and composites

In [36] fracture testing of composite materials with interfacial cracks is presented. Griffith, McClintock, and Novozhilov's fracture hypotheses are used. Theoretical and critical load values from each hypothesis are compared to experimental data in uni- and multi-axial loading conditions.

The Griffith criterion, which considers proportions between normal and tangential stresses produces the most accurate findings. Everyday hoop stresses regarded as a damage function yields the most detailed findings for the Novozhilov criterion. In contrast, the maximum primary stresses offers the correct values of the binding force for the McClintock criterion.

7. Conclusions

Although Fracture mechanics is now viewed as a well-established engineering discipline due to its reliability in addressing practical problems, existing standards are difficult to use in practice, most likely due to their complexity.

Testing is mostly done using ISO and ASTM standards due to their accuracy. For each standard, the advances that have been made have been incremental rather than significant. Fracture toughness testing, experimental evaluation, and standardization is still experiencing changes and improvements. Mode I loading is still the most popular mode of loading in fracture measurement.

There are still challenges in measurement of crack size in FCG. The use of fracture mechanics will always be of great importance to the advancement of the modern world since an accurate and dependable determination of fracture toughness is critical for assessing equipment failure.

References

1. S. Zhang, S. Zhou, M. Li, and B. Fu, "Calculation and comparison on fracture toughness of specific reliability between ASTM and ISO standards", *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 026529, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6c21>.
2. J. Ast, M. Ghidelli, K. Durst, M. Göken, M. Sebastiani, and A. M. Korsunsky, "A review of experimental approaches to fracture toughness evaluation at the micro-scale", *Mater. Des.*, vol. 173, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107762.
3. Ted. L. Anderson, *FRACTURE MECHANICS Fundamentals and Applications*, Third Edit. Taylor & Francis Group, 2005.
4. B. Cotterell, "The past, present, and future of fracture mechanics", *Eng. Fract. Mech.*, vol. 69, pp. 533–553, 2002.
5. J.A. Ávila, V. Lima, C.O.F.T. Ruchert, P.R. Mei, and A.J. Ramirez, "Guide for Recommended Practices to Perform Crack Tip Opening Displacement Tests in High Strength Low Alloy Steels," *Soldag. Inspeção*, vol. 21, no. 3, pp. 290–302, 2016.

6. R. Shaikh, T. Khan, A. Inamdar, M. Jaweed, and B. Malik, “Review of Fracture Toughness (G, K, J, CTOD, CTOA)”, *IOSR J. Eng. (IOSR JEN)*, vol. c, pp. 62–66, [Online]. Available: <http://www.iosrjen.org/>.
7. H. Schindler, “Fracture toughness for engineering application: There is need for more suitable testing standards”, *Procedia Struct. Integr.*, vol. 13, pp. 398–403, 2018, doi: 10.1016/j.prostr.2018.12.066.
8. X. Li, Z. Ding, C. Liu, S. Bao, and Z. Gao, “Evaluation and comparison of fracture toughness for metallic materials in different conditions by ASTM and ISO standards”, *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 187, no. August, p. 104189, 2020.
9. B. Nyhus, M.L. Polanco, and O. Ørjasæther, “SENT SPECIMENS AN ALTERNATIVE TO SENB SPECIMENS”, 2019, [Online]. Available: <https://www.asme.org/terms-of-use>.
10. B.S. Publication, “BSI Standards Publication Method of test for determination of fracture toughness in metallic materials using single edge notched tension (SENT)”, BS 8571:2014, 2014.
11. ASTM, *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness I*, vol. E1820 – 11, no. E1820 – 11 Standard. America: ASTM, 2012, pp. 1–56.
12. E. Lucon, T.S. Weeks, J.A. Gianetto, W.R. Tyson, and D.Y. Park, “Fracture Toughness Characterization of High- Pressure Pipe Girth Welds Using Single-Edge Notched Tension [SE (T)] Specimens Fracture”, *Mater. Perform. Charact. ASTM*, vol. 4, no. 2, 2015, doi: 10.1520/MPC20130098.
13. D. Gentile, I. Persechino, and N. Bonora, “Use of Circumferentially Cracked Bar sample for CTOD fracture toughness determination in the upper shelf regime”, *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 30, no. 30, pp. 252–262, 2014, doi: 10.3221/IGF-ESIS.30.32.
14. E. Wang, W. De Waele, and S. Hertelé, “A complementary npl approach in J and CTOD estimations for clamped SENT specimens”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 147, pp. 36–54, 2015, doi: 10.1016/j.engfracmech.2015.07.043.
15. P. R. Sreenivasan, “Inverse of Wallin ’ s relation for the effect of strain rate on the ASTM E-1921 reference temperature and its application to reference temperature estimation from Charpy tests”, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 241, pp. 67–81, 2011.
16. X. Zhu and J.A. Joyce, “DigitalCommons @ University of Nebraska - Lincoln Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 85, 2012, doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.02.001.
17. Brandon Paul Pehrson, “Masters thesis. Evaluation of Testing Procedure To Simplify JIc Calculations”, University of Tennessee – Knoxville, 2005.
18. C. Gustavo, H.B. Donato, Ruggieri, “ESTIMATION PROCEDURE FOR J AND CTOD FRACTURE PARAMETERS USING THREE-POINT BEND SPECIMENS”, *Proc. IPC2006 6th Int. Pipeline Conf.*, pp. 1–9, 2006.
19. I. Dzioba, P. Furmańczyk, and S. Lipiec, “The methods for determining the CTOD at crack initiation”, *nżynieria Mater.*, vol. 3, no. 223, pp. 116–121, 2018.

20. M. Graba, “NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF IN-PLANE CONSTRAINTS ON THE CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT FOR SEN (B) SPECIMENS UNDER PREDOMINANTLY PLANE STRAIN CONDITIONS”, *Int. J. Appl. Mech. Eng.*, vol. 21, no. 4, pp. 849–866, 2016, doi: 10.1515/ijame-2016-0050.
21. M. Graba, “Proposal of the hybrid solution to determining the selected fracture parameters for SEN (B) specimens dominated by plane strain”, *Bull. POLISH Acad. Sci., TECHNICAL Sci.*, vol. 65, no. 4, 2017, doi: 10.1515/bpasts-2017-0057.
22. J. Kowalski, “EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON SPECIMEN GEOMETRY EFFECT ON THE CTOD VALUE FOR VL-E36 SHIPBUILDING STEEL”, *POLISH Marit. Res.*, vol. 28, no. 111, pp. 110–116, 2021.
23. J. Kang, J.A. Gianetto, and W.R. Tyson, “Recent development in low-constraint fracture toughness testing for structural integrity assessment of pipelines”, *Front. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 546–553, 2018.
24. W.K. Nowacki, Z. Nowak, P. Perzyna, and R.B. Pęcherski, “EFFECT OF STRAIN RATE ON DUCTILE FRACTURE. A NEW METHODOLOGY”, *J. Theor. Appl. Mech.*, vol. 48, pp. 1003–1026, 2010.
25. M.S. MIRZA, D.C. BARTON, and P. CHURCH, “The effect of stress triaxiality and strain-rate on the fracture characteristics of ductile metals”, *J. Mater. Sci.*, vol. 31, p. 453–461, 1996.
26. Ž. Božić, M. Mlikota, and S. Schmauder, “APPLICATION OF THE ΔK , ΔJ AND Δ CTOD PARAMETERS IN FATIGUE CRACK GROWTH MODELLING”, *Tech. Gaz.*, vol. 18, no. 3, pp. 459–466, 2011.
27. K. Hectors and W. De Waele, “An X-FEM based framework for 3D fatigue crack growth using a B-spline crack geometry description”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 261, 2022.
28. D. Boroński, M. Kotyk, and P. Maćkowiak, “MEASUREMENT METHOD OF CRACK LENGTH IN COMPACT TENSION TYPE SPECIMENS MADE FROM THE Al / Ti LAYERED MATERIAL,” *Maint. Probl.*, vol. 3, pp. 17–26, 2016.
29. ASTM, “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates 1”, vol. E647 – 15, no. E647 – 15, pp. 1–48, 2016, doi: 10.1520/E0647-15.2.
30. S. Naib, P. Štefane, W. De Waele, N. Gubeljak, and S. Hertelé, “Tearing resistance of heterogeneous welds in Single Edge notched Tensile (SE (T)) testing”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 214, no. September 2018, pp. 194–211, 2019.
31. R.G. Savioli and C. Ruggieri, “IMPROVED J AND CTOD ESTIMATION FORMULAS FOR C(T) FRACTURE SPECIMENS INCLUDING OVERMATCHED WELDMENTS”, in *Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference PVP2011*, 2011, pp. 1–10.
32. B. Szybiński and P. Romanowicz, “Influence of crack presence on operating conditions of pressure vessels with flat endplates”, *J. KONES Powertrain Transp.*, vol. 23, no. 1, 2016.

33. DET NORSKE VERITAS (DNV), “FRACTURE CONTROL FOR PIPELINE INSTALLATION METHODS INTRODUCING CYCLIC PLASTIC STRAIN”, Høvik, Norway, 2006.
34. M. Rund et al., “Compatibility of fracture toughness results in the upper shelf region,” in *Procedia Structural Integrity, The 3rd International Conference on Structural Integrity*, 2019, vol. 17, pp. 479–486, doi: 10.1016/j.prostr.2019.08.063.
35. Koen Van Minnebruggen, “PhD thesis. Experimental-Numerical Study on the Feasibility of Spirally Welded Pipes in a Strain Based Design Context Koen Van Minnebruggen”, Ghent University, 2016.
36. G. Mieczkowski and K. Molski, “Verification of brittle fracture criteria for bimaterial structures”, *acta Mech. Autom.*, vol. 8, no. 1, pp. 44–48, 2014, doi: 10.2478/ama-2014-0008.

FRACTURE TOUGHNESS TEST METHODS AND SPECIMENS: A COMPARATIVE REVIEW OF RECENT PROGRES

Abstract

Since WWII, progress has been made in understanding how materials fail and how to prevent such failures. The reliability of fracture toughness as a design criterion has been improved greatly. This paper provides a review of recent improvements in fracture toughness testing in linear elastic and elastic-plastic fracture mechanics. The critical developments have been small and incremental advances rather than breakthroughs. Presently fracture toughness tests are mostly carried out following the ISO and ASTM standards, due to their accuracy although classic Charpy impact tests remain popular and frequently preferred. The literature shows that new standards and geometries have been implemented to accommodate a wider range of materials in terms of strength and size. ASTM, BSI, and ISO have improved their standards to accurately measure fracture toughness. Materials that were too for K_{IC} and miniature materials can now be characterized in terms of fracture toughness parameters. Furthermore, a new area of fracture mechanics research field has been born due to the use of computer technology.

Keywords: fracture mechanics, fracture toughness, stress intensity factor, CTOD, J-integral

METODY BADAŃ ODPORNOŚCI NA PĘKANIE PRÓBKKI: PORÓWNAWCZY PRZEGLĄD OSTATNICH POSTĘPÓW

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania oparte na pomiarach odporności na pękanie. W pracy wykazano, że standaryzacja ma kluczowe znaczenie w stosowaniu technik mechaniki pękania do analizy solidności konstrukcji, projektowania tolerancji na uszkodzenia, oceny przydatności do eksploatacji i analizy wytrzymałości szczątkowej. W kolejnych krokach dokonano przeglądu literatury oraz przedstawiono badania skupiające się tylko na najnowszych postępach. Ponadto dokonano przeglądu przyrostowych postępów, które nastąpiły w ciągu ostatnich dwóch dekad w mechanice pękania, oraz omówiono i porównano postępy w metodzie badania SEN (są próbkami). Opisano badanie odporności na pękanie niekonwencjonalnych geometrii, rozmiarów i materiałów. Podsumowano ostatnie udoskonalenia w badaniach odporności na pękanie i standaryzacji.

Słowa kluczowe: mechanika pękania, odporność na pękanie, współczynnik intensywności naprężeń, CTOD, J-całka

Michał KLIMCZYK¹, Jagoda MUSZYŃSKA-PAŁYS²

THE USE OF HYDROGEN AS AVIATION FUEL

1. Introduction

According to The ICAO Environmental Report 2022, aviation produced 915 million tons of carbon dioxide (CO₂) in 2019. Although the COVID-19 pandemic affected the sector's emissions, the industry is likely to recover, reaching or even exceeding pre-COVID-19 emission levels within a few years. Depending on the scenario of technological and operational improvements, emissions from international aviation could increase between 2 and 4 times by 2050 2018 levels. [1].

The latest IRENA's report identifies several major changes that are needed to achieve decarbonization of the aviation sector. These include reducing aviation demand and accelerating fuel efficiency gains, introducing a robust mix of low-carbon fuels in the form of biofuels and synthetic kerosene, and commercializing new electric and hydrogen aircraft. The analysis performed by the International Renewable Energy Agency shows that 90% of the solutions to help meet the 2050 climate targets include the use of renewable energy in sectors such as direct transportation, electrification, green hydrogen and bioenergy combined with carbon capture and storage. The use of hydrogen and its derivatives accounts for 10% of all ways to reduce carbon emissions under the 1.5°C scenario [2].

The periodic table of elements is a listing in table form of all chemical elements, arranged according to their ascending atomic number. The most current version of the periodic table published by IUPAC is dated November 28, 2016 and contains 118 elements. The smallest and lightest of these is hydrogen but at the same time it is also the most abundant element on Earth. It can be encountered in the atmosphere, water, organic molecules and also other chemical compounds. In addition, hydrogen accounts for 73.4% of the Sun's mass. Hydrogen is an important alternative for clean energy in today's world. However, it should be remembered that

¹ m.klimczyk@prz.edu.pl, Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, <https://w.prz.edu.pl>

² j.muszynska@prz.edu.pl Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, <https://w.prz.edu.pl>

its environmental benefits are directly related to the process of its production [3]. Nevertheless, hydrogen has the potential to become a clean and safe source of energy to power modern aviation. This can be evidenced by the hydrogen aircraft prototypes, for example: Tupolev Tu-155, Antares DLR-H2 or AOS-H2, shown in Figure 1, Figure 2 [4] and Figure 3. In the Tu-155, one of the three engines was powered directly by liquid hydrogen, while the DLR-H2 and AOS-H2 were designs using hydrogen-powered fuel cells and electric motors to generate thrust.



Fig. 1. Tupolev Tu-155

Rys. 1. Tupolev Tu-155

Source: G. E. Dorrington, G. Baxter, C. Bil, A. Subic, and P. M. Trivailo, "Tupolev Tu-155", Proceedings of the 15th Australian International Aerospace Congress, vol. 154, pp. 116–125, 2013 [5]



Fig. 2. Antares DLR-H2

Rys. 2. Antares DLR-H2

Source: J. Kallo, "Antares DLR-H2", Fuel Cells Bulletin, no. July, p. 4, 2008 [6]



Fig. 3. AOS-H2

Rys. 3. AOS-H2

Source: <https://www.meil.pw.edu.pl/MEiL/Topinfo/AOS-H2>

In 2020, Airbus has launched a research and development project called "ZEROe," which consists of three conceptual aircraft models powered by hydrogen power systems. Under this project, Airbus plans to introduce aircraft powered by hydrogen power systems that will reduce aviation-related greenhouse gas emissions. The project aims to research and develop technology to enable the commercial use of hydrogen as a fuel in aircraft. One of the concept aircraft models, the A320neo, is to be powered by hydrogen turbofan engines, which will reduce greenhouse gas emissions by 50-60% compared to current A320neo aircraft. Project ZEROe is one of Airbus' most important green aviation projects. Airbus plans to achieve a mature technology readiness level for a hydrogen-combustion propulsion system by 2025 [7].

The purpose of this publication is to review available research relating to the use of hydrogen in aviation to help identify areas in need of development and further research.

2. Research problem

The literature on H₂ICE (H₂ Internal Combustion Engine) is extensive, with the first references to the hydrogen engine dating back more than 200 years. In 1820, the Reverend W. Cecil wrote a treatise entitled "On the Application of Hydrogen Gas to Produce Moving Power in Machinery". In this treatise, he described an engine that operated on the principle of vacuum, which was produced by burning hydrogen gas. The surviving materials contain many details about the engine's construction but there is no evidence whether it was ever built by Cecil [8].

As mentioned earlier, hydrogen is the most common element in the universe and can be a very efficient energy carrier. However, in order to do so, it must be liquefied or pressurized due to its parameters as shown in the charts below [9]. Figure 4 shows the energy-to-weight ratio for lithium-ion batteries, jet fuel and hydrogen. Figure 5 shows the energy-to-size ratio for the aforementioned three different aviation fuels.

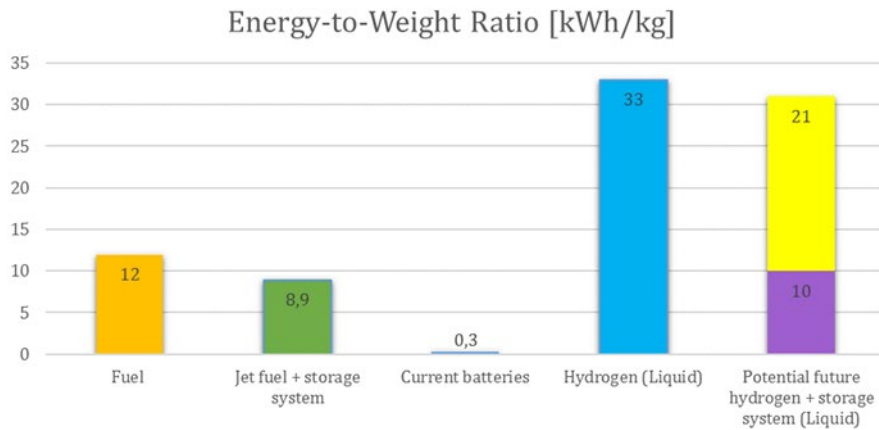


Fig. 4. The specific energy density with respect to the weight of different aviation fuels

Rys. 4. Gęstość właściwa energii w odniesieniu do masy różnych paliw lotniczych

Source: R. Thomson, U. Weichenhain, N. Sachdeva, and M. Kaufmann, "A future fuel for aviation?", p. 28, 2020, [Online]. Available: rolandberger.com/en/Publications/Hydrogen-A-future-fuel-of-aviation.html [10]

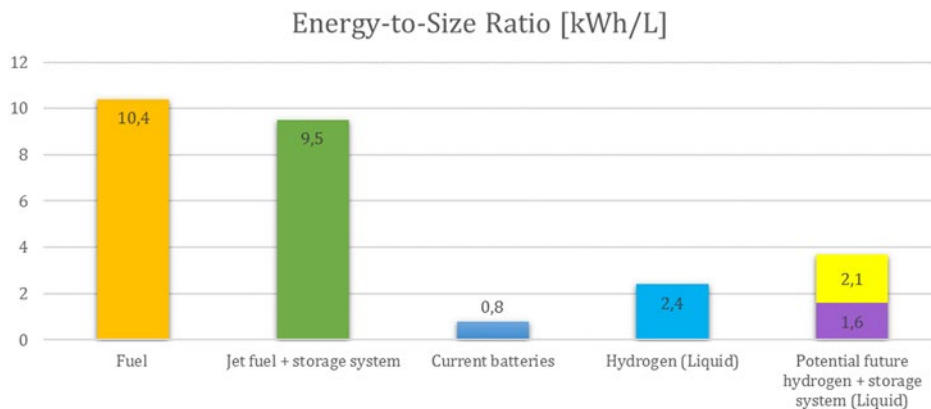


Fig. 5. The specific energy density with respect to the volume of different aviation fuels

Rys. 5. Gęstość właściwa energii w odniesieniu do objętości różnych paliw lotniczych

Source: R. Thomson, U. Weichenhain, N. Sachdeva, and M. Kaufmann, "A future fuel for aviation?", p. 28, 2020, [Online]. Available: rolandberger.com/en/Publications/Hydrogen-A-future-fuel-of-aviation.html [10]

As can be seen from the graphs above, hydrogen has a relatively high mass energy density and a relatively low volumetric energy density. In practice, this means that low mass hydrogen carries a relatively large amount while occupying a significant spatial volume. While the first parameter is advantageous from an aeronautical point of view as it limits the mass of the fuel, the second parameter implies the need for a fuel system that limits the volume of hydrogen.

As mentioned earlier, such a fuel system can reduce the volume of hydrogen by increasing the pressure or reducing the storage temperature. It is therefore to be expected that such a fuel system may be heavier than a conventional system.

3. Replacement of kerosene by hydrogen in theory

One article [12], using the TF33 gas turbine engine as an example, compares the effect of switching from jet fuel to hydrogen on the thermodynamic parameters of this engine. Figure 5 provides a schematic representation of the TF33 engine in sections.

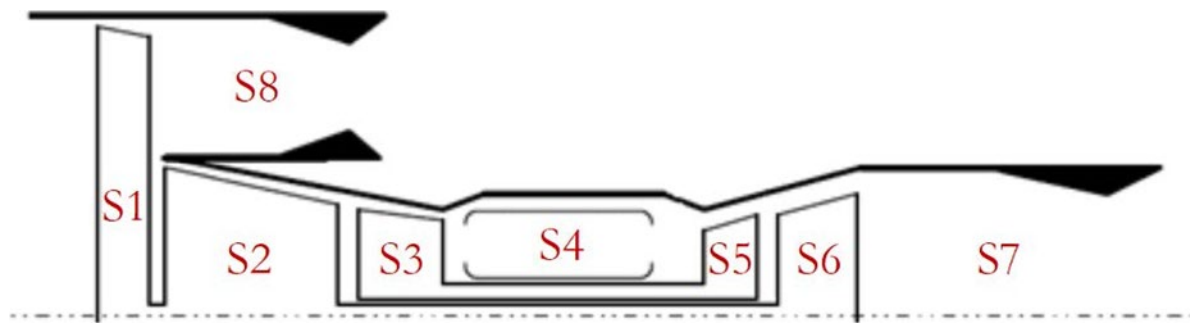


Fig. 6. Schematic illustration of the TF33 based on sections

Rys. 6. Schematyczna ilustracja TF33 z zaznaczonymi sekcjami

Source: Pratt & Whitney. TF33 Engine [11]

Table 1 presents detailed presentation of the TF33 engine sections and Table 2 contains a comparative analysis of the properties of the analysed fuels.

Table 1

Detailed presentation of the TF33 engine sections

Sections	S1		S2		S3		S4	
Definitions	fan		low pressure compressor (LPC)		high pressure compressor (HPC)		combustion chamber (CC)	
Numeration	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
	1	2	5	6	6	7	8	9
Sections	S5		S6		S7		S8	
Definitions	high pressure turbine (HPT)		low pressure turbine (LPT)		exhaust nozzle (EDN)		fan nozzle (FDN)	
Numeration	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
	9	10	10	11	11	12	3	4

Source: O. Balli, E. Ozbek, S. Ekici, A. Midilli, and T. Hikmet Karakoc, "Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen in benchmark with kerosene", Fuel, vol. 306, August, p. 121686, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121686 [12]

Table 2

Benchmarking of the fuels' properties subject to analysis

Fuel	Molar Weight M [kg/kmol]	Lower Heating Value LHV [kJ/kg]	Fuel Mass Flow Rate \dot{m}_f [kg/s]	Energy Rate \dot{E} [kW]
Kerosene	167,314	43,254 [13]	1,443	62406,871
Hydrogen	2,016	119,450 [14]	0,522	62406,871

Source: O. Balli, E. Ozbek, S. Ekici, A. Midilli, and T. Hikmet Karakoc, "Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen in benchmark with kerosene", Fuel, vol. 306, August, p. 121686, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121686 [12]

For the purpose of the calculations, the analysis was performed for sea level conditions and for the take-off position. Table 3 contains the results of thermodynamic analysis calculations for both fuels, Table 4 contains exergetic environmental and sustainability indicators and performance evaluation parameters of the TF33 engine.

Table 3

The performance metrics of the engine found by employing thermodynamic analysis for the separate use of both fuels

Performance Metrics	Symbol	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	Change (%)
Fuel Energy Rate [kW]	\dot{E}_F	62406,87	62406,87	0,00
Product Energy Rate [kW]	\dot{E}_{pr}	23096,52	22919,50	Decreased by 0,766
Energy Efficiency (%)	η	37,01	36,73	Decreased by 0,757
Specific Fuel Consumption [kg.kN ⁻¹ .s ⁻¹]	<i>SFC</i>	0,015	0,006	Decreased by 60,61
Specific Thrust [kNs.kg ⁻¹]	<i>ST</i>	0,444	0,441	Decreased by 0,68
Fuel Heating Value Ratio	<i>FHVR</i>	149,55	412,99	Increased by 176,16
Thermal Limit Ratio	<i>TLR</i>	3,87	3,81	Decreased by 1,55
Enthalpy Ratio	<i>ER</i>	4,67	4,72	Increased by 1,07
Thrust Ratio	<i>TR</i>	0,68	0,68	-
Fuel Cost Rate [\$.s ⁻¹]	<i>FCR</i>	0,66	2,58	Increased by 290,91
Specific fuel cost per engine thrust [\$.kN ⁻¹ .s ⁻¹]	<i>SFCR_{ET}</i>	0,007090	0,027800	Increased by 292,10
Specific product cost per engine power [\$.kJ ⁻¹]	<i>SFCR_{pr}</i>	0,000029	0,000113	Increased by 289,65

Source: O. Balli, E. Ozbek, S. Ekici, A. Midilli, T. Hikmet Karakoc, "Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen in benchmark with kerosene", Fuel, vol. 306, August, p. 121686, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121686 [12]

Table 4

Exergetic environmental and sustainability indicators and performance evaluation parameters of the TF33 engine

Components	Exergy Destruction [kW]		Exergy Efficiency N (%)		Exergy Destruction Ratio ExDR (%)		Waste Exergy Ratio WExR (%)		Exergetic Improvement Potential ExIP [kW]		Relative Exergetic Improvement Potential RExIP (%)	
	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂
Fan	2261,4	2261,4	83,17	83,17	5,82	5,22	5,24	4,76	380,58	380,58	2,53	2,09
FDN	97,32	97,32	98,50	98,50	0,25	0,22	0,23	0,20	1,46	1,46	0,01	0,01
LPC	1140,98	1140,98	89,12	89,12	2,94	2,63	2,64	2,40	124,19	124,19	0,82	0,68
HPC	2442,32	2442,32	87,54	87,54	6,29	5,63	5,66	5,14	304,39	304,39	2,02	1,67
CC	30684,47	34957,06	53,68	50,4	78,98	80,64	71,10	73,60	14211,63	17354,20	94,30	95,24
HPT	311,01	389,44	98,48	98,1	0,80	0,90	0,72	0,82	4,72	7,37	0,03	0,04
LPT	367,06	517,09	98,53	97,9	0,94	1,19	0,85	1,09	5,41	10,67	0,04	0,06
EDN	336,22	337,16	98,43	98,40	0,87	0,78	0,78	0,71	5,29	5,41	0,04	0,03
LPTMS	610,5	609,95	97,51	97,5	1,57	1,41	1,41	1,28	15,19	15,17	0,10	0,08
HPTMS	598,87	589,78	97,03	97	1,54	1,38	1,39	1,26	17,76	17,75	0,12	0,10
Bypass	-	-	91,09	91,1	-	-	1,32	1,20	-	-	-	-
END _{out}	-	-	82,23	82,7	-	-	8,66	7,53	-	-	-	-

Components	Productivity Lack Ratio PLR		Fuel Exergy Waste Ratio FExWR		Environmental Effect Factor EEf		Ecological Effect Factor EcoEF		Sustainable Efficiency Factor SEF		Exergetic Sustainability Index ESI	
	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	C ₁₂ H ₂₃	H ₂
Fan	9,79	9,87	16,83	16,83	0,202	0,2	1,202	1,2	5,942	5,942	4,942	4,942
FDN	0,42	0,42	1,50	1,50	0,015	0,02	1,015	1,02	66,612	66,612	65,612	65,61
LPC	4,94	4,98	10,88	10,88	0,122	0,12	1,122	1,12	9,188	9,188	8,188	8,188
HPC	10,57	10,66	12,46	12,46	0,142	0,14	1,142	1,14	8,024	8,024	7,024	7,024
CC	132,85	152,52	46,32	49,6	0,863	0,99	1,863	1,99	2,159	2,014	1,159	1,014
HPT	1,35	1,7	1,52	1,89	0,015	0,02	1,015	1,02	65,934	52,857	64,934	51,86
LPT	1,59	2,26	1,47	2,06	0,015	0,02	1,015	1,02	67,830	48,439	66,83	47,44
EDN	1,46	1,47	1,57	1,60	0,016	0,02	1,016	1,02	63,506	62,331	62,506	61,33
LPTMS	2,64	2,66	2,49	2,49	0,026	0,03	1,026	1,03	40,181	40,217	39,181	39,22
HPTMS	2,59	2,61	2,97	2,96	0,031	0,03	1,031	1,03	33,722	33,727	32,722	32,73
Bypass	2,46	2,48	8,91	8,91	0,098	0,1	1,098	1,1	11,217	11,217	10,217	10,22
END _{out}	16,17	15,6	17,77	17,3	0,216	0,21	1,216	1,21	5,626	5,784	4,626	4,784

Source: O. Balli, E. Ozbek, S. Ekici, A. Midilli, and T. Hikmet Karakoc, "Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen in benchmark with kerosene", Fuel, vol. 306, August, p. 121686, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121686 [12]

The conclusions that can be drawn from this analysis are as follows:

- a higher lower heating value for hydrogen resulting in reduced fuel flow may mean that the gas turbine engine will save fuel by running on hydrogen,
- the negligible value of CO₂ in the mass composition of H₂ combustion products demonstrates the superiority of a hydrogen-powered engine but the increase in N₂ highlights its sustainability weakness,
- the lower temperature at the entrance to the combustion chamber of a hydrogen-powered engine will facilitate the choice of combustion chamber material,
- the energy efficiency and specific thrust of the hydrogen engine are lower and the fuel cost index is higher, these results show the weaknesses of the hydrogen engine compared to the traditional turbofan engine.

4. Test flights using hydrogen fuel

One of the first test flights using liquid hydrogen was the Airbus A320 flight, which took place in April 2016. The flight was part of the "Cryoplane" project, which aimed to test the use of liquid hydrogen as a fuel for passenger aircraft. During the flight, the aircraft was powered by a fuel mixture consisting of 5% liquid hydrogen and 95% kerosene, which allowed for testing of the engine and fuel system under real conditions.

Another example of a test flight using liquid hydrogen was the Boeing 787 Dreamliner flight, which took place in December 2020. During this three-hour flight, the aircraft was powered by a fuel mixture consisting of 20% liquid hydrogen and 80% conventional aviation fuel. The flight was part of a research project aimed at exploring the possibility of powering passenger aircraft with liquid hydrogen.

It is also worth mentioning the "HyFlyer" initiative. HyFlyer is a research project aimed at testing the use of liquid hydrogen as a fuel for aircraft. The project was developed by the British company ZeroAvia in collaboration with the British Department of Transport and under the Clean Sky 2 program of the European Union. HyFlyer involves prototype flight tests of electrically powered aircraft, fueled by electricity from batteries and hydrogen in the form of gas. The aim of the project is to demonstrate that liquid hydrogen can be an effective and environmentally friendly alternative energy source for aviation. Several test flights have been conducted as part of the project, including a flight of the Cessna 337 Skymaster aircraft, which took place in 2020. The aircraft was powered solely by liquid hydrogen, making it the first such flight in aviation history. The purpose of the flight was to test the possibility of using liquid hydrogen as a fuel for small aircraft and drones [16].

5. Conclusion

The article suggests that using hydrogen as a fuel for aircraft is a promising solution that can contribute to reducing greenhouse gas emissions in aviation. Currently, numerous research projects are underway to test the use of liquid hydrogen as an alternative source of energy for aircraft engines.

The results of previous studies are promising, and test flights using liquid hydrogen conducted by companies such as Airbus and Boeing show that the use of this fuel is possible and safe. However, for the widespread use of liquid hydrogen to become a reality, it is necessary to develop appropriate infrastructure for the production, storage, and distribution of this fuel, which can be costly and require significant financial investment.

Despite these challenges, the prospect of using hydrogen as an alternative fuel in aviation seems increasingly realistic and could help reduce the impact of aviation on climate change.

6. Directions for further research

This article has confirmed the validity of considering the use of hydrogen as an aviation fuel. In addition, it has shown that there is both research and an implementation aspect to the interest in hydrogen in aviation, as evidenced by the publications cited and the programmes of major aerospace companies. On the basis of this article, one of the key challenges has been identified - the need to develop a fuel system capable of storing hydrogen on board aircraft. Further research work will address the design of hydrogen aircraft, the feasibility of transporting hydrogen and the preparation of a flight operation model of a hydrogen-fuelled aircraft.

References

1. ICAO, Innovation for a green transition, p. 414, 2022.
2. IRENA, World energy transitions outlook: 1.5 degrees pathway. 2021.
3. Germscheidt R.L. et al.: Hydrogen Environmental Benefits Depend on the Way of Production: An Overview of the Main Processes Production and Challenges by 2050, *Adv. Energy Sustain. Res.*, vol. 2, no. 10, p. 2100093, 2021, DOI: 10.1002/aesr.202100093.
4. Dincer I., Acar C.: A review on potential use of hydrogen in aviation applications, *Int. J. Sustain. Aviat.*, vol. 2, no. 1, p. 74, 2016, DOI: 10.1504/ijsa.2016.076077.
5. Dorrington G.E., Baxter G., Bil C., Subic A., Trivailo P.M.: Tupolev Tu-155, *Proceedings of the 15th Australian International Aerospace Congress*, vol. 154. pp. 116–125, 2013.
6. Kallo J.: Antares DLR-H2, *Fuel Cells Bulletin*, July. p. 4, 2008.
7. <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>
8. Dunn S.: *Hydrogen, History of*, vol. 3, pp. 241–252, 2004.
9. Kristiansen B.J.: *Hydrogen Electric Airplanes*, March 2021, pp. 92–102, 2020.
10. Thomson R., Weichenhain U., Sachdeva N., Kaufmann M.: A future fuel for aviation?, p. 28, 2020, [Online]. Available: rolandberger.com/en/Publications/Hydrogen-A-future-fuel-of-aviation.html.
11. TF33 Engine _ Pratt & Whitney.
12. Balli O., Ozbek E., Ekici S., Midilli A., Hikmet Karakoc T.: Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen in benchmark with kerosene, *Fuel*, vol. 306, August, p. 121686, 2021, DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121686.
13. Balli O., Ekici S., Karakoc T.H.: TF33 Turbofan engine in every respect: Performance, environmental, and sustainability assessment, *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 40, no. 3, pp. 0–2, 2021, DOI: 10.1002/ep.13578.
14. Balli O., Sohret Y., Karakoc H.T.: The effects of hydrogen fuel usage on the exergetic performance of a turbojet engine, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 23, pp. 10848–10858, 2018, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.178.

15. YA. Çengel, MA. Boles: Thermodynamics: an engineering approach. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
16. <https://www.emec.org.uk/projects/hydrogen-projects/hyflyer/>

THE USE OF HYDROGEN AS AVIATION FUEL

Abstract

With the increase in the number of flights and the growing share of air transport in global travel, there is a growing awareness of the negative effects of emissions of harmful and toxic compounds contained in aircraft engine exhaust. As awareness of the need to protect the environment and reduce greenhouse gas emissions increases, there is a growing demand for alternative sources of energy in aviation that will reduce greenhouse gas emissions and operating costs. One solution that is increasingly being considered is the use of hydrogen as fuel for aircraft propulsion. Hydrogen, with its very high energy content and low emissions of harmful substances, has the potential to be one of the most efficient and environmentally friendly sources of energy for aviation. Hydrogen can be produced from various sources, such as natural gas, water, or by water electrolysis using renewable energy. In the article, the use of Hydrogen in aviation over the years was discussed, focusing on the advantages and challenges associated with this technology, as well as examples of test flights that have already been conducted using this fuel.

Keywords: hydrogen, aviation, alternative propulsion, decarbonisation, hybridization

WYKORZYSTANIE WODORU JAKO PALIWA LOTNICZEGO

Streszczenie

Wraz ze wzrostem liczby lotów i zwiększającym się udziałem transportu lotniczego w globalnym przemieszczaniu się rośnie świadomość negatywnych skutków, jakie niesie ze sobą emisja związków szkodliwych i toksycznych zawartych w spalinach silników lotniczych. Z rosnącą świadomością społeczną w zakresie konieczności ochrony środowiska i redukcji emisji gazów cieplarnianych zwiększa się zapotrzebowanie na alternatywne źródła energii w lotnictwie, które pozwolą na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych oraz kosztów eksploatacji samolotów. Jednym z rozwiązań, na które coraz częściej zwraca się uwagę, jest wykorzystanie wodoru jako paliwa do napędzania samolotów. Wodór, dzięki bardzo wysokiej

zawartości energii i niskiej emisji szkodliwych substancji, ma potencjał, by być jednym z najbardziej efektywnych i przyjaznych dla środowiska źródeł energii dla lotnictwa. Wodór może być wytwarzany z różnych źródeł, takich jak gaz ziemny, woda lub przez elektrolizę wody za pomocą energii odnawialnej. W artykule omówiono wykorzystanie wodoru w lotnictwie na przestrzeni lat, zwracając uwagę na zalety i wyzwania związane z tą technologią, a także na przykłady lotów testowych, które już zostały przeprowadzone z wykorzystaniem paliwa wodorowego.

Słowa kluczowe: wodór, lotnictwo, alternatywne źródła napędu, dekarbonizacja, hybrydyzacja

Adam KOCHAŃSKI¹, Agnieszka SĘKALA²

PRZYKŁAD SYNTEZY WYBRANEGO UKŁADU PNEUMATYCZNEGO

1. Wprowadzenie

Proces projektowania układów automatyki wymaga od inżyniera szerokiej wiedzy teoretycznej, doświadczenia i umiejętności praktycznych. W celu tworzenia wydajnych, niezawodnych i oszczędnych systemów sterowania niezbędna jest znajomość zagadnień z dziedzin m.in. takich jak mechanika i budowa maszyn, automatyka i sterowanie, eksploatacja układów mechatronicznych oraz elektronika. Ponadto konieczne jest zrozumienie budowy i zasad działania układów wykonawczych, pomiarowych i przetworników. Sprawia to, że od inżyniera stojącego przed zadaniem zaprojektowania układu automatyki przemysłowej wymaga się, aby był otwarty i interdyscyplinarny. Jednocześnie stale rosną wymagania światowej gospodarki rynkowej dotyczące jakości produktu, kosztów jego produkcji, niezawodności, estetyki i minimalnego czasu do wprowadzenia go na rynek (TTM – Time to Market). Gdy chce się utrzymać konkurencyjność przedsiębiorstwa, konieczne jest wdrożenie efektywnej strategii prowadzenia procesu projektowo-konstrukcyjnego i zarządzania produkcją. Wobec tego zastosowanie komputerowego wspomaganie przy projektowaniu i symulacji działania skomplikowanych układów pneumatycznych staje się nieodzownym narzędziem w ręku współczesnego inżyniera. Oczywiście, pomimo że oprogramowanie znacząco ułatwia prace projektowe, niezbędny jest jednak pewien poziom specjalizacji jego użytkownika. Wspomaganie komputerowe zwalnia człowieka od wykonywania prostych, powtarzalnych czy nużących czynności, pozostawiając mu zadania bardziej wymagające – podejmowanie decyzji, koncipowanie, a przede wszystkim myślenie logiczne [1-6].

¹ adamkoc583@student.polsl.pl, Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/>

² agnieszka.sekala@polsl.pl, Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/>

1.1. Projektowanie układów pneumatycznych

Poznanie struktury i zasad działania tworzonych obiektów oraz opracowanie odpowiednich algorytmów sterujących pracą całego układu jest głównym celem projektowania pneumatycznych i elektropneumatycznych układów sterowania [1]. Do opisu zasad działania poszczególnych elementów pneumatycznych, jak również całych układów stosuje się znormalizowany zapis symboliczny, zawarty w normach ISO 1219-1:2012 oraz ISO 1219-2:2012 [3]. Projektowanie pneumatycznych układów sterowania polega głównie na doborze odpowiednich, znormalizowanych elementów pneumatycznych i sterujących oraz opracowaniu sposobu połączenia ich w jeden spójny system, realizujący zakładane zadanie i działający zgodnie z przyjętymi kryteriami: związanymi m.in. z dynamiką ruchu, niezawodnością czy aspektami ekonomicznymi. Zadowalające spełnienie przyjętych kryteriów osiąga się na drodze syntezy układów sterowania. Synteza polega na podjęciu odpowiednich działań zmierzających do jak największego uproszczenia projektowanego układu, tj. zarówno pod względem liczby elementów składowych, jak i optymalnego połączenia ich w całość. Jednocześnie, pomimo minimalizacji, układ powinien nadal realizować założone zadania [7].

W procesie doboru podstawowych elementów składowych układu pneumatycznego wyróżnia się dwa podstawowe etapy. W pierwszym etapie należy dobrać elementy wykonawcze. Wytypowanie siłowników i silników realizowane jest na podstawie założeń projektowych dotyczących charakteru pracy układu, dynamiki działania napędów pneumatycznych, występujących obciążeń i warunków otoczenia. W drugim etapie dobierane są urządzenia rozdzielające i sterujące (głównie zawory). Ich parametry powinny zapewniać prawidłową współpracę z członami wykonawczymi układu oraz uwzględniać zjawisko spadku ciśnienia [8].

1.2. Metody syntezy układów pneumatycznych

Istnieje wiele sposobów syntezy pneumatycznych układów automatyki. Ogólnie metody te można podzielić na trzy podstawowe grupy, tj.: metody intuicyjne, algorytmiczne oraz analityczne.

Metoda intuicyjna wymaga od inżyniera dużego doświadczenia oraz umiejętności analizy złożonych układów pneumatycznych pod kątem wyodrębnienia pewnych powtarzających się podukładów elementarnych. Konstruktor powinien znać zasady działania elementów automatyki, sposoby ich łączenia oraz integracji urządzeń pneumatycznych z elektronicznym i mechanicznym osprzętem sterującym. Sposób intuicyjny jest stosowany najczęściej przy projektowaniu układów o niskim stopniu skomplikowania, zbudowanych z niewielkiej liczby elementów. Należy być świadomym, że omawiana metoda syntezy nie daje pewności odnośnie do uzyskania optymalnego doboru elementów i konfiguracji połączeń między nimi. Jednakże

charakteryzuje się przejrzystością – poprawność zaprojektowanego układu można sprawdzić w prosty sposób. Detekcja typowych błędów występujących w projektowanych układach sterowania, takich jak logiczne błędy połączeń, nieprawidłowy dobór elementów sterujących, rozdzielających i wykonawczych, jest realizowana na drodze opracowania cyklogramów pracy (diagramów stanów) i wykresów czasowych. Diagramy te pozwalają na graficzną prezentację działania elementów układu w funkcji czasu [7, 8].

Istotą metod algorytmicznych jest postępowanie według procedury wskazującej, jakie elementy pneumatyczne należy dobrać oraz jak zrealizować ich połączenia. Zaletą tego sposobu jest możliwość zastosowania w odniesieniu do układów bardzo rozbudowanych, złożonych z dużej liczby elementów, które działają w jednym cyklu roboczym. Na podstawie utworzonej tablicy stanów, nazywanej też tablicą prawdy, tworzy się logiczne wyrażenie strukturalne opisujące sposób działania układu pneumatycznego. Następnie, mając na uwadze elementarne tożsamości logiczne, przeprowadza się minimalizację funkcji układu. Wyrażenie prawa działania układu za pomocą funkcji logicznej jest korzystne ze względu na możliwość łatwego jej odwzorowania przez zastosowanie tak zwanych zaworów logicznych: negacji, koniunkcji oraz alternatywy [1, 7].

Synteza metodami analitycznymi jest zwykle stosowana w przypadku projektowania skomplikowanych układów działających w kilku zmiennych cyklach roboczych. Tego typu układy charakteryzują się rozbudowanym blokiem przetwarzania informacji ze względu na dużą ilość napływających do układu sygnałów sterujących. Postępowanie analityczne oznacza w tym przypadku działanie mające na celu znalezienie postaci funkcji przełączających opisujących zakładane działanie układu oraz określenie warunków, jakie muszą być spełnione przez dobierane elementy mające te funkcje realizować. Metody analityczne wymagają bardzo dobrej znajomości teorii układów przełączających, praw algebry Boole'a i specjalistycznych algorytmów, np. budowy tablic Karnaugh'a lub metody Quine'a-McCluskeya [1, 7].

1.3. Zastosowanie wspomaganie komputerowe przy projektowaniu pneumatycznych układów sterowania

Zastosowanie oprogramowania komputerowego, zarówno w procesie projektowania pneumatycznych bądź elektropneumatycznych układów sterowania, jak i ich symulacji, pozwala na wyeliminowanie błędów projektowych w początkowych etapach przygotowania rzeczywistego układu automatyki, przyczyniając się tym samym do znacznego skrócenia czasu jego uruchomienia [2]. Ponadto wykorzystanie oprogramowania komputerowego umożliwia dobór elementów wykonawczych, sterujących oraz rozdzielających w sposób optymalny – weryfikacja poprawności doboru jest realizowana na drodze opracowania modelu symulacyjnego i poddania go badaniom. Za używaniem komputerowego wspomaganie syntezy układów sterowania przemawia łatwość wprowadzania w nich zmian, brak konieczności przeprowadzania żmudnych procedur sprawdzających opartych na algorytmach analitycznych i możliwość korzystania z zasobów zgromadzonych w bibliotekach dołączonych do

oprogramowania. W przypadku układów płynowych istnieje możliwość wsparcia nie tylko procesu projektowania i symulacji ich działania. Z racji stawianych wymogów niezawodnego działania oraz konieczności optymalizacji przedmiotowych układów pod kątem energetycznym możliwa jest także ocena stanu technicznego, detekcja niesprawności i przewidywanie trwałości poszczególnych elementów w celu minimalizacji przestoju. Co więcej, techniki komputerowe pomagają w rozbudowie i zwiększaniu efektywności istniejących już układów – częstą praktyką jest odtworzenie w oprogramowaniu postaci fizycznego środka technicznego i uzupełnienie o dodatkowe, wirtualne komponenty. Dzięki temu możliwe jest prowadzenie prac inżynierskich bez potrzeby zatrzymywania działających układów automatyki przemysłowej, co związane jest z kosztami [4].

Oprogramowanie wspomagające projektowanie i symulację układów płynowych (pneumatycznych, elektropneumatycznych i hydraulicznych) jest obecnie szeroko dostępne, a producenci oferują różne rozwiązania: od prostych, intuicyjnych narzędzi służących do przyspieszenia sporządzania graficznych schematów układów sterowania aż po wielozadaniowe programy, łączące w sobie możliwość rysowania, wykonywania obliczeń, sporządzania symulacji i wizualizacji układów płynowych, do których obsługi niezbędne są specjalistyczne umiejętności. Nierzadko moduł odpowiedzialny za tworzenie i testowanie wirtualnych odpowiedników układów pneumatycznych jest jedynie jedną z wielu składowych kompleksowych środowisk CAx. Wielu producentów elementów pneumatycznych decyduje się na udostępnianie potencjalnym klientom, za pośrednictwem przeglądarki internetowej, bezpłatnych narzędzi wspomagających dobór odpowiednich komponentów bądź sporządzanie schematów.

Przez niemalże 30 lat rozwoju profesjonalnego oprogramowania wspomagającego projektowanie i symulację układów płynowych pewne jego cechy stały się standardem. Z punktu widzenia użytkownika tego typu środowisko komputerowe powinno cechować się [4]:

- wsparciem inżyniera w jak największej liczbie etapów procesu projektowo-konstrukcyjnego;
- przyjaznym interfejsem umożliwiającym pracę w programie bez potrzeby posiadania wyspecjalizowanej wiedzy;
- interakcją z użytkownikiem i odpowiedzią na jego działania – w postaci podpowiedzi, ostrzeżeń, dialogu czy raportu z przeprowadzonej symulacji;
- łatwością wprowadzania zmian i tworzenia różnych wariantów projektowanych układów sterowania;
- możliwością współpracy z innymi środowiskami programowymi za pośrednictwem ustandaryzowanych interfejsów komunikacyjnych, mechanizmów importu i eksportu;
- rozbudowaną bazą danych pozwalającą na opracowanie kompleksowych, wirtualnych układów sterowania w celu minimalizacji angażowania zewnętrznych bibliotek i opracowywania własnych modeli;
- mechanizmami pozwalającymi na pracę w zespole, współdzielenie zasobów i zdalną współpracę, również synchroniczną.

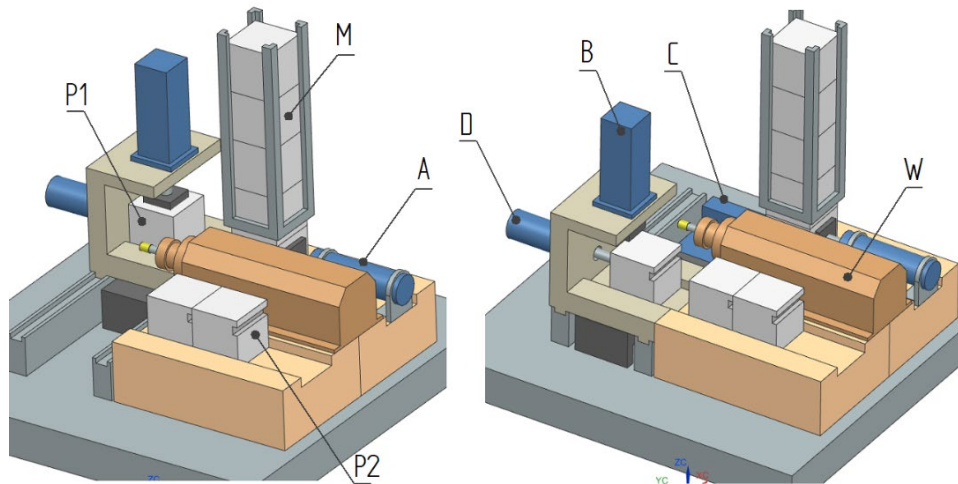
Wśród programów komputerowych wspomagających projektowanie i konstruowanie układów pneumatycznych można wyróżnić trzy główne grupy, tj.:

- programy usprawniające proces tworzenia graficznych schematów układów pneumatycznych opierając się na znormalizowanych symbolach elementów pneumatycznych. Często są to darmowe rozwiązania on-line, z możliwością pracy w przeglądarce internetowej (np. FluidDraw (Festo), PneuDraw (SMC), PNEUFLUID (Pneumax) i Scheme Editor (Bosch Rexroth));
- programy przystosowane do tworzenia modeli, dynamicznej ich edycji oraz symulacji i wizualizacji działania układów sterowania na podstawie wbudowanych algorytmów i zgodnie z zadanymi przez użytkownika parametrami (np. FluidSIM-P (Festo), Automation Studio (Famic), Simcenter Amesim (Siemens) oraz autoSIM-200 (SMC));
- zaawansowane systemy wspomagające projektowanie – systemy eksperckie, których podstawę często stanowią algorytmy sztucznej inteligencji. Zadaniem systemów jest dostarczenie użytkownikowi wiedzy ułatwiającej podejmowanie decyzji przy doborze elementów systemów pneumatycznych i optymalizacji układów. Systemy eksperckie działają na podstawie baz wiedzy, baz danych, interpretatora, mechanizmów wnioskowania i procesora lingwistycznego umożliwiającego współdziałanie z użytkownikiem na drodze prowadzenia dialogu (np. system firmy CKD o nazwie: Pneumatic components selection system [4]).

2. Przykład syntezy układu pneumatycznego metodą algorytmiczną ze wspomaganie komputerowym

W niniejszym rozdziale przedstawiono przebieg i metodologię procesu projektowania pneumatycznego układu sterowania, a następnie przykład wykorzystania narzędzi komputerowych do wspomaganie rozwiązania zadania syntezy układu pneumatycznego metodą algorytmiczną (nieanalityczną).

Rozważany przykład obejmuje zaprojektowanie układu sterowania sekwencyjnego, automatycznego przyrządu do frezowania rowków w sześciennych elementach aluminiowych. Schemat ideowy urządzenia pokazano na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Schemat ideowy przyrządu do frezowania rowków w elementach aluminiowych (opracowanie własne na podstawie [10])

Fig. 2.1. The schematic diagram of the device for milling grooves in aluminum elements (own elaboration based on [10])

Dany jest opis słowny zakładanego cyklu pracy rozpatrywanego przyrządu, zgodnie z rys. 2.1 [10]:

- Przedmioty obrabiane **P1** umieszczone są w magazynie **M**.
- Siłownik **A** wysuwa przedmioty z magazynu na stół roboczy.
- Do tłoczyska siłownika **B** przytwierdzono uchwyt mocujący półfabrykaty na czas obróbki. Za obróbkę odpowiada wrzeciono frezarskie **W**.
- Siłownik **C** nadaje stołowi z obrabianym przedmiotem ruch posuwowy.
- Siłownik **D** pełni funkcję wyrzutnika, transportując obrobione elementy **P2** do magazynu wyjściowego.
- Pojedynczy cykl jest wyzwalany przyciskiem na zaworze rozdzielającym sterowanym ręcznie **S**.

W odniesieniu do projektowanego układu przyjęto następujące założenia:

- Sieć zakładowa zapewnia ciśnienie sprężonego powietrza $p = 0,8 \text{ MPa}$.
- Spadek ciśnienia w zespole przygotowania powietrza ma wynosić 25%, czyli $\Delta p = 0,2 \text{ MPa}$.
- Skok siłownika **A** powinien być równy $s_A = 100 \text{ mm}$. Wyzwalana siła musi spełniać warunek $P_A \geq 50 \text{ N}$, natomiast czas działania $t_A = 2 \text{ s}$.
- Siłownik **B** ma wykonywać ruch ze skokiem $s_B = 50 \text{ mm}$. Ze względu na przyjęte parametry procesu skrawania siła docisku przedmiotu obrabianego musi spełniać warunek $P_B \geq 2500 \text{ N}$. Czas cyklu wynosić ma $t_B = 10 \text{ s}$.
- Siłownik **C** powinien zapewniać płynność ruchu posuwowego. Z uwagi na zmienność obciążenia na długości skoku za stabilizację prędkości ruchu tłoczyska ma odpowiadać hydrokontroler montowany równolegle z siłownikiem. Wymagania postawione siłownikowi **C** to skok $s_C = 150 \text{ mm}$, siła pchająca przesuwu stołu roboczego $P_C \geq 450 \text{ N}$ i czas cyklu wynoszący $t_C = 10 \text{ s}$.

- Warunki pracy siłownika **D** mają być takie same jak dla jednostki **A**.
- Masa przedmiotu obrabianego wynosi $m = 5 \text{ kg}$.
- Długość przewodów między zaworami rozdzielającymi a komorami roboczymi siłownika przyjęto w każdym przypadku za $l = 0,5 \text{ m}$.


W procesie projektowania pneumatycznego układu sterowania istotną częścią prac inżyniera jest wykonanie obliczeń projektowych mających na celu określenie warunków pracy układu, dobór elementów z katalogu oraz weryfikację, czy system spełnia postawione przed nim wymagania. W konwencjonalnym procesie projektowo-konstrukcyjnym obliczenia są prowadzone przy użyciu prostych, przybliżonych modeli matematycznych, często na podstawie o wartości parametrów określonych doświadczalnie i nomogramów producentów elementów pneumatyki przemysłowej. Przeważnie za dane wejściowe do obliczeń przyjmuje się [10]:

- siłę użyteczną (obciążenie tłoczyska),
- zakres ruchu (skok) tłoczyska siłownika,
- wymagany czas ruchu tłoka bądź prędkość tłoka,
- charakter obciążenia tłoczyska.


Dane te pozwalają na wyznaczenie współczynnika sprawności, teoretycznej siły pchającej lub ciągnącej, wymaganej średnicy nominalnej tłoka siłownika i w efekcie – dobór jednostki napędowej z katalogu. Dalsze kroki obejmują weryfikację wytrzymałościową, np. ze względu na wyboczenie w przypadku zastosowania siłowników o większym skoku. W kolejnym etapie procesu projektowania dobiera się zawory rozdzielające – zależnie od obciążenia tłoczyska i prędkości tłoka siłownika. Następnie określa się sumaryczne natężenie przepływu powietrza oraz ciśnienie. Na tej podstawie zachodzi dobór zestawu elementów przygotowania sprężonego powietrza (filtrów, zaworów redukcyjnych, smarownicy (w razie konieczności), zaworów odcinających oraz przewodów przewodów) [10].

Zdecydowanie większą pewność niż postępowanie konwencjonalne odnośnie do poprawności doboru elementów dają obliczenia wykonane w narzędziach komputerowych – duża szybkość wykonywania obliczeń pozwala na implementację złożonych modeli matematycznych, pełniej opisujących rzeczywiste warunki pracy układu. Użytkownik zazwyczaj podaje tylko wartości liczbowe parametrów wejściowych i określa podstawowe warunki pracy układu. Jednym z programów wspomagających ten etap procesu projektowania układów pneumatycznych jest wspomniany wcześniej system ekspercki CKD Pneumatic components selection. Korzystając z tego narzędzia, dokonano doboru siłowników zgodnie z założeniami rozpatrywanego przykładu. Na rys. 2.2a-c przedstawiono wygenerowane raporty, zawierające podsumowanie zadeklarowanych warunków pracy dobieranego siłownika oraz zestawienie numerów zamówieniowych sugerowanych elementów pneumatycznych.


a)

		Calculation result	
Selecting conditions		Cylinder load factor 3.55 % Size of load 17.15 N Composite effective sectional area 1.29 mm ² Cylinder operation time 0.33 sec Kinetic energy 0.311 J Working piston speed 352 mm/s Air consumption (1 reciprocation/min.) 1.20 l/min	
Transport/Transfer Operational direction PUSH Working pressure 0.60 MPa Stroke length 100 mm Pipe length 0.50 m Target operation time 2.00 sec Load condition Weight 5.00 kg Set load factor 50.00 % Coefficient of friction Slip Installation angle 0°		Appropriate cylinder alternatives CMK2-32-100 Peripheral devices Valve 4SB010-M5 Speed control valve SC3W-6-6 Silencer SLM-M5 Joint GWS6-M5 Tube 6-4 nylon tube	

b)

		Calculation result	
Selecting conditions		Cylinder load factor 52.06 % Size of load 2.453.45 N Composite effective sectional area 12.57 mm ² Cylinder operation time 0.25 sec Kinetic energy 0.129 J Working piston speed 303 mm/s Air consumption (1 reciprocation/min.) 5.74 l/min	
Pressfit/Clamp Operational direction PUSH Working pressure 0.60 MPa Stroke length 50 mm Pipe length 0.50 m Target operation time 10.00 sec Load condition Weight 5.00 kg Load 2500.00 N Set load factor 70.00 % Coefficient of friction Without guide Installation angle -90°		Appropriate cylinder alternatives SC.A2.100-50 Peripheral devices Valve 4GB310-10 Speed control valve SC3W-15-10 Silencer SLW-10A Joint GWS10-10 Tube 10-7.5 nylon tube	

c)

		Calculation result	
Selecting conditions		Cylinder load factor 26.29 % Size of load 154.28 N Composite effective sectional area 1.41 mm ² Cylinder operation time 0.71 sec Kinetic energy 2.177 J Working piston speed 311 mm/s Air consumption (1 reciprocation/min.) 2.13 l/min	
Transport/Transfer Operational direction PUSH Working pressure 0.60 MPa Stroke length 150 mm Pipe length 0.50 m Target operation time 10.00 sec Load condition Weight 45.00 kg Set load factor 70.00 % Coefficient of friction Slip Installation angle 0°		Appropriate cylinder alternatives LCG-25-150 Peripheral devices Valve 4SB010-M5 Speed control valve SC3W-6-6 Silencer SLM-M5 Joint GWS6-M5 Tube 6-4 nylon tube	

Rys. 2.2. Raport z doboru siłownika C. Dane wejściowe i propozycja siłownika wraz z dodatkowym osprzętem z katalogu CKD

Fig. 2.2. The C actuator selection report. Input data and proposal of the actuator with additional accessories from the CKD catalog

Przez zastosowanie wspomaganie komputerowego zredukowano czas doboru elementów układu. Nie było konieczne wykonanie czynności takich jak przeprowadzenie obliczeń czy przeszukiwanie katalogów producentów.

2.1. Synteza układu metodą algorytmiczną

Kolejnym etapem procesu projektowo-konstrukcyjnego, po dobraniu podstawowych elementów układu, jest synteza prowadząca do wyznaczenia typu, liczby i sposobu połączenia komponentów sterujących. W przypadku układu sekwencyjnego z rozważanego zadania zastosowano metodę algorytmiczną jednostek taktujących. Jej używanie do syntezy układów czysto pneumatycznych wymaga przyjęcia następujących założeń [8, 10]:

- Elementami wykonawczymi w układzie są siłowniki jednostronnego działania i dwustronnego działania. Współpracują one z dwustanowymi, trójdrogowymi lub czterodrogowymi zaworami rozdzielającymi, które są przełączane pneumatycznie.
- Kontrola położenia skrajnych tłoczków siłowników realizowana jest przez wyłączniki krańcowe w postaci zaworów rozdzielających trójdrogowych, zazwyczaj z rolką, na którą oddziałuje krzywka mocowana na tłoczysku.

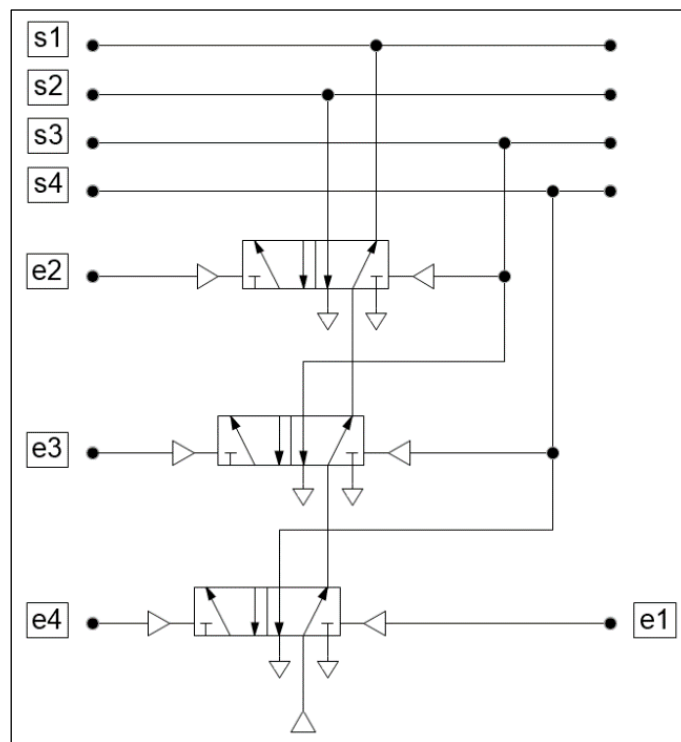
- Mogą być stosowane elementy wejściowe, czyli zawory rozdzielające sterowane ręcznie bądź mechanicznie.
- Dopuszcza się używanie komponentów przetwarzających sygnały, takich jak zawory realizujące funkcje logiczne koniunkcji i alternatywy.
- Za zmianę charakterystyki pracy aktuatorów odpowiadają zawory zwrotno-dławiące, zawory szybkiego spustu, np. elementy te dodaje się do schematu w ostatnim etapie syntezy, ponieważ ich obecność nie ma wpływu na jej algorytm.

Metoda jednostek taktujących polega na stosowaniu specjalnych bloków pamięci, inaczej – jednostek taktujących. Są to grupy zaworów rozdzielających, które mają za zadanie [10]:

- przygotowanie układu do przejścia do następnego kroku (taktu) sekwencji,
- neutralizację (zamknięcie) obwodów układu, których działanie wywołuje poprzedni krok,
- wykonanie czynności roboczych, których zakończenie powoduje realizację następnego kroku.

Jedną z najczęściej stosowanych grup zaworów mogących spełnić te zadania jest tak zwana kaskada pneumatyczna – zespół czterodrogowych lub pięciodrogowych, dwupołożeniowych zaworów rozdzielających sterowanych pneumatycznie w połączeniu szeregowym.

Układ kaskady zawiera taką samą liczbę wejść e_i i wyjść s_i . Sygnały podawane kolejno na wejścia e_1, e_2, \dots, e_n powodują wygenerowanie odpowiednio sygnałów wyjściowych s_1, s_2, \dots, s_n . Schemat kaskady czterowejściowej przedstawiono na rys. 2.3 [10].



Rys. 2.3. Schemat pneumatycznej kaskady czterowejściowej (opracowanie własne na podstawie [9])
 Fig. 2.3. The scheme of a four-input pneumatic cascade (own elaboration based on [9])

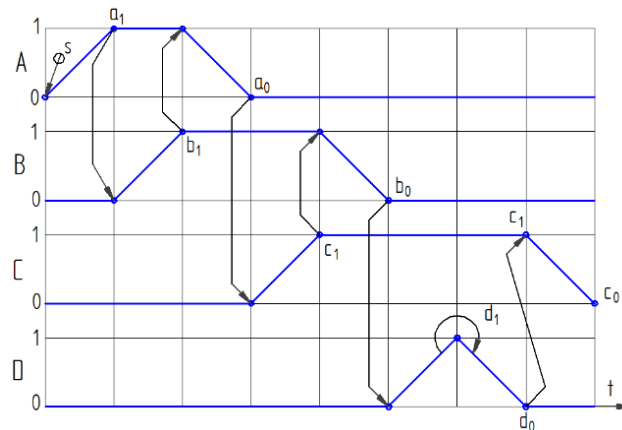
W metodzie algorytmicznej, w pierwszym kroku, należy dokonać odpowiedniego opisu pracy sterowanego urządzenia. Najczęściej rozpoczyna się od opisu słownego, przechodząc następnie do opisu uproszczonego za pomocą określonej symboliki – dla zdarzeń występujących w układzie i jego elementów. Przyjęto, że przy syntezie układów pneumatycznych, poza literą będącą referencją do elementu, używa się symboli [8, 10]:

- +, oznaczającego wysunięcie tłoczyska siłownika bądź zadziałanie elementu,
- −, oznaczającego wsunięcie tłoczyska siłownika lub wyłączenie elementu,
- \pm , oznaczającego krótkotrwałe zadziałanie elementu.

Na podstawie opisu słownego zakładanego cyklu pracy rozpatrywanego przyrządu (rys. 2.4) można zapisać go w sposób symboliczny. Przyjęto, że cykl pracy urządzenia rozpoczyna każdorazowo stan wysoki przełącznika ręcznego lub mechanicznego S:

$$S_{\pm}, A+, B+, A-, C+, B-, D+, D-, C- \quad (1)$$

Symbolicznie zapisaną formułę cyklu pracy układu zwykle przedstawia się graficznie, za pomocą wykresu czasowego (cyklogramu) lub grafu. Na wykresie czasowym ilustruje się stan poszczególnych elementów systemu w funkcji czasu oraz określa warunki przejścia do następnych taktów. Na rys. 2.4 przedstawiono cyklogram działania rozważanego układu sterowania przyrządem do frezowania prostopadłościennych przedmiotów aluminiowych.



Rys. 2.4. Diagram krokowy działania układu sterowania przyrządem do frezowania prostopadłościennych przedmiotów aluminiowych (opracowanie własne na podstawie [9])

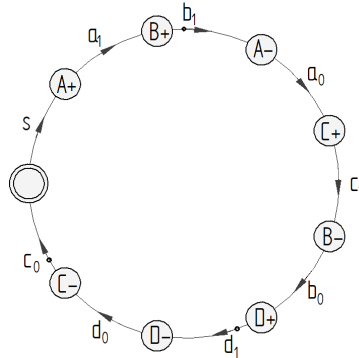
Fig. 2.4. The state diagram of the system for milling rectangular aluminum objects (own elaboration based on [9])

Graf opisujący sekwencję działania układu składa się z wierzchołków, reprezentujących stany elementów wykonawczych (oznaczone okręgiem z literą wewnątrz) oraz łuków skierowanych, które odzwierciedlają sterujące sygnały wejściowe, powodujące przejście układu do kolejnego stanu. Wyróżnia się dwa rodzaje stanów wewnętrznych układu [9, 10]:

- stany niestabilne – przejście elementu wykonawczego do następnego stanu zależy od podania sygnału sterującego pochodzącego z wewnątrz układu (oznaczane pojedynczym okręgiem);

- stany stabilne – w celu przejścia do następnego stanu wymagane jest podanie sygnału z zewnątrz układu (oznaczane podwójnych okręgiem).

Zakładając, że w krańcowych położeniach tłoczyśk siłowników **A**, **B**, **C** i **D** (według rys. 2.1) uaktywnianie są wyłączniki drogowe a_0 , a_1 , b_0 , b_1 , c_0 , c_1 , d_0 , i d_1 oraz że naciśnięcie przycisku s rozpoczyna cykl, utworzono graf działania układu (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Graf działania układu z rys. 2.1 (opracowanie własne na podstawie [10])

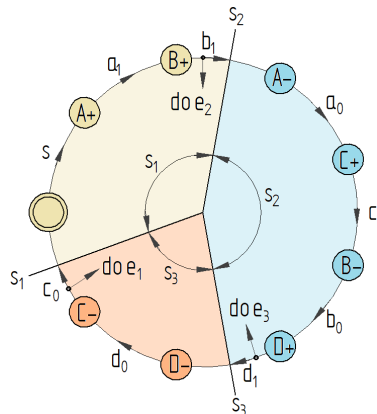
Fig. 2.5. The diagram of the system shown in Fig. 2.1 (own elaboration based on [10])

Przedstawiony graf stanowi jednoznaczny opis cyklu pracy projektowanego układu pneumatycznego. Ogólny algorytm postępowania przy syntezie układu metodą jednostek taktujących zakłada uszczegółowienie grafu, na podstawie którego w ostatecznym etapie rysuje się graficzny schemat systemu. Kolejno wykonuje się następujące czynności [10]:

- Graf należy podzielić na grupy tak, aby w każdej z grup zmiana stanu danego elementu następowała jedynie raz. Zaleca się, aby stan stabilny występował na początku grupy stanów, w skład której wchodzi.
- Dobiera się blok pamięci o liczbie wejść e_i równej liczbie grup wynikającej z podziału grafu.
- Wyjścia s_i jednostki taktującej stanowią zasilanie wyłączników drogowych (krańcowych) należących do danej grupy. Jeśli wyłącznik jest wykorzystywany w więcej niż jednej grupie, zasila się go niezależnie (z głównego źródła sprężonego powietrza), a jego wyjście łączone jest z odpowiednimi sygnałami wyjściowymi bloku pamięci za pośrednictwem elementów koniunkcji.
- Wejścia e_i jednostki taktującej łączy się z wyjściami wyłączników drogowych odpowiadających łukom, które przecina linia graniczna grupy. Jeżeli łukowi przypisano więcej niż jeden element, należy połączyć je szeregowo.
- Linie wejściowe zaworów rozdzielających, które sterują aktuatorami, zasila się przez wyjścia elementów powodujących określone działanie wskazane symbolicznie w okręgu wierzchołka grafu.
- Jeżeli elementy wykonawcze mają działać równocześnie, wejścia ich komór roboczych łączy się równolegle.

- W przypadku gdy różne sygnały skutkują tym samym działaniem elementu wykonawczego, przed zaworem rozdzielającym używa się komponentu alternatywy.
- Tranzycja do pierwszego stanu grupy zachodzi w wyniku działania korespondującego sygnału s_i jednostki taktującej.
- Sygnał, po którego wystąpieniu układ przechodzi w stan stabilny, używany jest do zasilania elementu wejściowego w postaci np. zaworu sterowanego ręcznie lub mechanicznie, którego zadziałanie rozpoczyna cykl.

Postępując według opisanego algorytmu, zaprojektowano układ sterowania pneumatycznym przyrządem do frezowania elementów aluminiowych. Graf układu (rys. 2.5) podzielono na trzy grupy, według wytycznych pierwszego punktu instrukcji. Ponadto określono powiązania między wielkościami wejściowymi e_i i wyjściowymi s_i jednostki taktującej a sygnałami wewnętrznymi układu pochodzącymi od wyłączników drogowych. Otrzymano w ten sposób graf uszczegółowiony, widoczny na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Uszczegółowiony graf działania układu z rys. 2.1 (opracowanie własne na podstawie [10])
Fig. 2.6. The detailed graph of the system shown in Fig. 2.1 (own elaboration based on [10])

Z uwagi na fakt, że podziału grafu dokonano na trzy grupy, podstawą do budowy rozważanego układu sterowania powinna być trzywejściowa jednostka taktująca. Podjęto decyzję, że rolę bloku pamięci będzie odgrywać kaskada pneumatyczna złożona z dwóch zaworów pięciodrogowych, dwupołożeniowych, sterowanych pneumatycznie, zestawionych w połączeniu szeregowym. Zgodnie z rys. 2.6 połączenia do wejść bloku pamięci realizowane są w następujący sposób:

- wejście e_1 łączone jest z wyjściem wyłącznika krańcowego c_0 ,
- wejście e_2 łączone jest z wyjściem wyłącznika krańcowego b_1 ,
- wejście e_3 łączone jest z wyjściem wyłącznika krańcowego d_1 .

Dalsza analiza grafu pozwala zaprojektować połączenia między wejściami sterującymi zaworów rozdzielających odpowiedzialnych za współpracę z elementami wykonawczymi a innymi komponentami układu. Odpowiednie kanały zaworów oznaczono w sposób

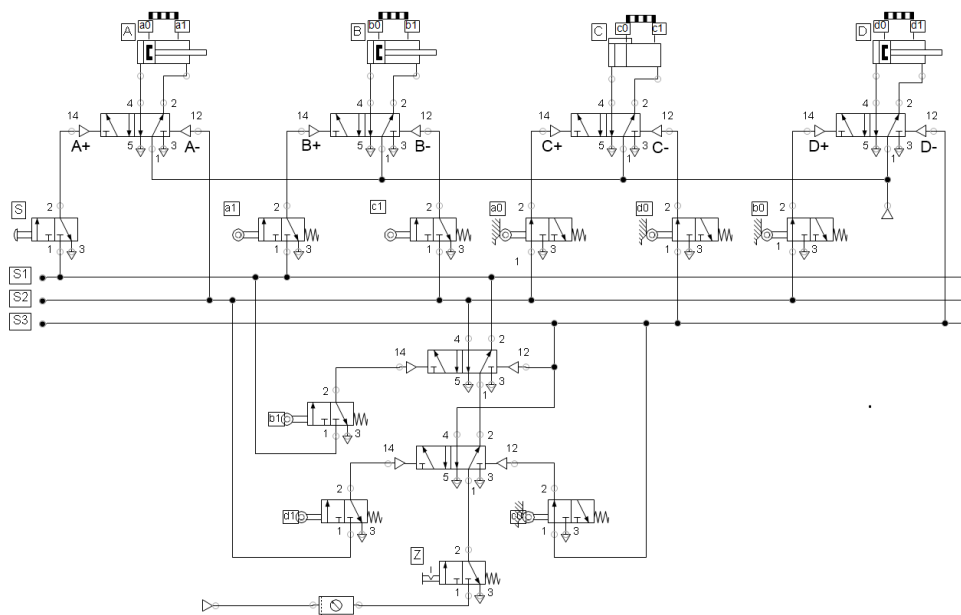
symboliczny, zgodnie ze stanem, jaki następuje po ich zasileniu. Sposób realizacji połączeń jest następujący:

- wejście ($A+$) należy połączyć z wyjściem zaworu z przyciskiem S ,
- wejście ($A-$) należy zasilić bezpośrednio sygnałem s_2 , gdyż jest to pierwszy wierzchołek grafu grupy drugiej,
- wejście ($B+$) należy połączyć z wyjściem wyłącznika krańcowego a_1 ,
- wejście ($B-$) należy połączyć z wyjściem wyłącznika krańcowego c_1 ,
- wejście ($C+$) należy połączyć z wyjściem wyłącznika krańcowego a_0 ,
- wejście ($C-$) należy połączyć z wyjściem wyłącznika krańcowego d_0 ,
- wejście ($D+$) należy połączyć z wyjściem wyłącznika krańcowego b_0 ,
- wejście ($D-$) należy zasilić bezpośrednio sygnałem s_3 , ponieważ jest to pierwszy wierzchołek grafu grupy trzeciej.

W ostatnim etapie syntezy układu należy wskazać sposób zasilania poszczególnych jego elementów. Jak już wcześniej stwierdzono, kanały wyjściowe kaskady należy połączyć z wejściami komponentów z odpowiedniej grupy grafu:

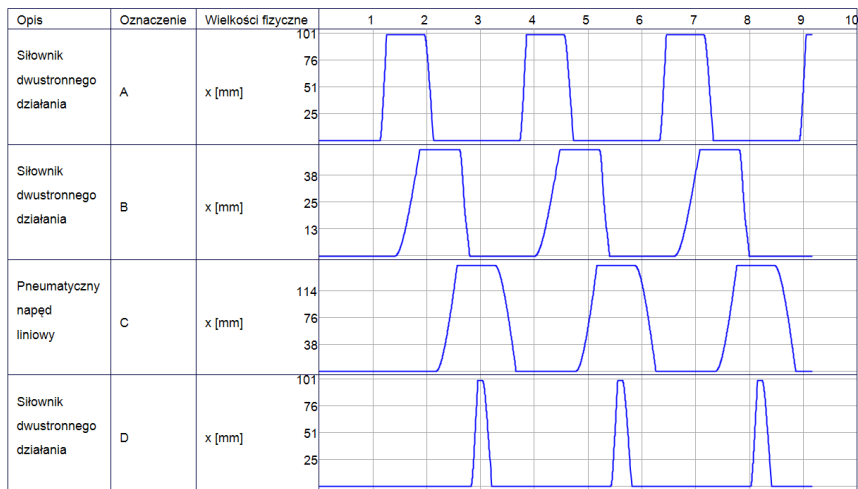
- elementy grupy I, czyli zawór z przyciskiem S oraz wyłączniki krańcowe a_1 i b_1 , powinien zasilać sygnał s_1 ,
- elementy grupy II, czyli wyłączniki krańcowe a_0 , c_1 , b_0 i d_1 powinien zasilać sygnał s_2 ,
- elementy grupy III, czyli wyłączniki krańcowe d_0 i c_0 powinien zasilać sygnał s_3 .

Mając na uwadze konieczność weryfikacji przeprowadzonego wcześniej procesu projektowania, do graficznej prezentacji układu skorzystano z oprogramowania FluidSIM-P. Utworzony schemat, przedstawiony na rys. 2.7, jest jednocześnie modelem, który można poddać symulacji celem jego konfrontacji z założeniami projektowymi.



Rys. 2.7. Schemat pneumatycznego układu sterowania (opracowanie własne)
Fig. 2.7. The scheme of the pneumatic control system (own elaboration)

Sprawdzenie prawidłowości działania układu wykonano przez obserwację pracy modelu symulacyjnego oraz porównanie diagramu stanu (rys. 2.4) z wykresem stanów tworzonym podczas symulacji (rys. 2.8). Stwierdzono pełną zgodność.



Rys. 2.8. Cyklogram pracy modelu symulacyjnego (opracowanie własne)
 Fig. 2.8. The state diagram of the system (own elaboration)

3. Wnioski

Metoda zastosowana w niniejszym artykule może stanowić uniwersalne narzędzie przy projektowaniu sekwencyjnych układów pneumatycznych o różnym stopniu skomplikowania. Narzędzia komputerowe znacznie wspomagają projektowanie pneumatycznych układów sterowania. Ilość informacji dostarczana przez odpowiednio użyte oprogramowanie ma skalę praktycznie niemożliwą do uzyskania w tak krótkim czasie w przypadku konwencjonalnego procesu projektowo-konstrukcyjnego. Symulacja komputerowa może dostarczyć informacji pozwalających podjąć najlepsze decyzje, tym samym istotnie przyczyniając się do zwiększenia poprawności procesów. Zastosowanie symulacji znacząco skraca czas opracowania projektu układu sterowania, ponieważ ewentualne błędy zauważone na etapie symulacji mogą zostać wyeliminowane. Ponadto symulacja umożliwia weryfikację poprawności działania projektowanego układu, a także jego optymalizację bez konieczności wykonywania modeli fizycznych. Pozwala to na skrócenie procesu projektowo-konstrukcyjnego przy jednoczesnym zachowaniu jego sekwencyjno-iteracyjnego charakteru.

Bibliografia

1. Świder J. (red.): Podstawy syntezy pneumatycznych i elektropneumatycznych układów sterowania. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2018.
2. Kost. G. Sękała A.: Projektowanie i symulacja pneumatycznych i elektropneumatycznych układów sterowania w środowisku FluidSIM-P. Utrzymanie Ruchu nr 2, 2020.
3. Kost. G. Sękała A.: Interpretacja schematów pneumatycznych układów sterowania Podstawy Cz. 1. Utrzymanie Ruchu, nr 3, 2018.
4. Trela Z.: Komputerowe wspomaganie projektowania układów płynowych. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 3/2013, s. 2255-2263.
5. Ilyukhin Y., Poduraev Y., Arfikyan S.: Computer Simulation of Electro-Pneumatic Drives for Vertical Motion Mobile Robots. 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2015, p. 1003-1012.
6. Gołębski R.: Możliwości oprogramowania FluidSIM-P jako narzędzie dydaktyczne symulacji układów pneumatyki. Technika Transportu Szynowego, 12/2015, s. 2549-2552.
7. Kordowicz-Sot A.: Projektowanie układów elektropneumatycznych urządzeń i systemów mechatronicznych. Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2005.
8. Świder J., Wszolek G.: Metodyczny zbiór zadań laboratoryjnych i projektowych ze sterowania procesami technologicznymi. Układy pneumatyczne i elektropneumatyczne ze sterowaniem logicznym (PLC). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
9. Kowalski G., Cader M., Borkowicz Z.: Wykorzystanie symulacji komputerowych w procesie projektowania mobilnych robotów inspekcyjnych. Pomiar Automatyka Robotyka, 2/2010, s. 351-360.
10. Szenajch W.: Napęd i sterowanie pneumatyczne. WNT, Warszawa 2016.

PRZYKŁAD SYNTEZY WYBRANEGO UKŁADU PNEUMATYCZNEGO

Streszczenie

Układy pneumatyczne znajdują w przemyśle zastosowanie wszędzie tam, gdzie wymaga się od napędów i sterowania m.in. dużej niezawodności, łatwości serwisowania i bezpieczeństwa pracy. W artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat metod syntezy układów pneumatycznych. Przedstawiono schemat postępowania przy projektowaniu sekwencyjnego układu sterowania pneumatycznego. W celu znalezienia optymalnej topologii układu posłużono się metodą algorytmiczną (nieanalityczną). W stadiach doboru elementów

układu, opracowania schematu graficznego oraz szacowania zużycia sprężonego powietrza zastosowano narzędzia wspomaganie komputerowego.

Słowa kluczowe: pneumatyka, układy pneumatyczne, wspomaganie komputerowe, symulacja komputerowa

AN EXAMPLE OF THE SYNTHESIS OF A SELECTED PNEUMATIC SYSTEM

Abstract

Pneumatic systems are used in the industry everywhere where high reliability, easy maintenance, and safety of work of drives and control systems are required. The article presents basic information on the methods of synthesis of pneumatic systems. A scheme of procedure for the design of a sequential pneumatic control system is presented. To find the optimal system topology, the algorithmic method (non-analytical method) was used. Computer-aided tools were used in the stages of selecting system elements, developing graphic diagrams, and estimating compressed air consumption.

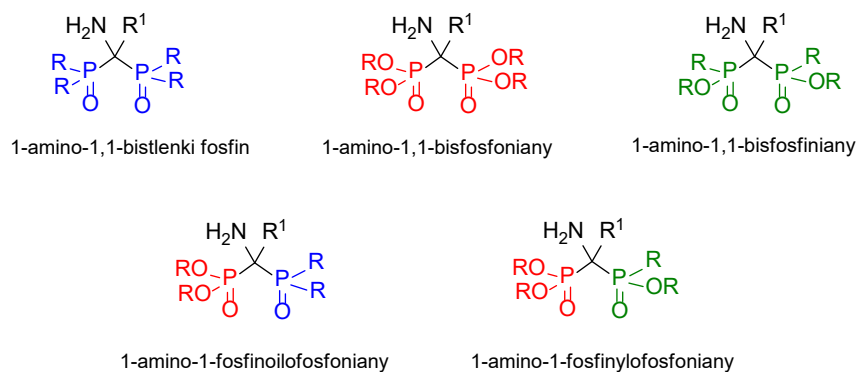
Keywords: pneumatics, pneumatic systems, computer-aided technologies, computer simulation

Dominika KOZICKA¹, Anna KUŹNIK²

NIESYMETRYCZNE FOSFONOWO-FOSFINOWE ORAZ FOSFONOWO-FOSFINOILOWE POCHODNE 1-AMINO-1,1-BISFOSFOROWE I METODY ICH SYNTEZY

1. Pochodne 1-amino-1,1-bisfosforowe i ich aktywność biologiczna

Pochodne 1-amino-1,1-bisfosforowe, z uwagi na ich biologiczny potencjał, cieszą się niesłabnącym zainteresowaniem naukowców nieustannie od wielu lat. Najbardziej charakterystycznymi elementami strukturalnymi tych pochodnych są szkielet P-C-P, odpowiedzialny w dużym stopniu za ich aktywność biologiczną, oraz grupa aminowa połączona z geminalnym atomem węgla. W zależności od rodzaju grup fosforowych tworzących mostek P-C-P, związki tego typu można podzielić na kilka zasadniczych grup: α -aminobistlenki fosfin, mające dwie grupy fosfinoilowe, kwasy α -aminobisfosfonowe i ich estry, zawierające dwie grupy fosfonowe, kwasy α -aminobisfosfinowe i ich pochodne estrowe oraz niesymetryczne fosfonowo-fosfinoilowe oraz fosfonowo-fosfinowe analogi α -aminobisfosfonianów, zawierające grupy fosfonową oraz fosfinoilową lub fosfinową (rys. 1.1).



R, R¹ = H, Alk, Ar

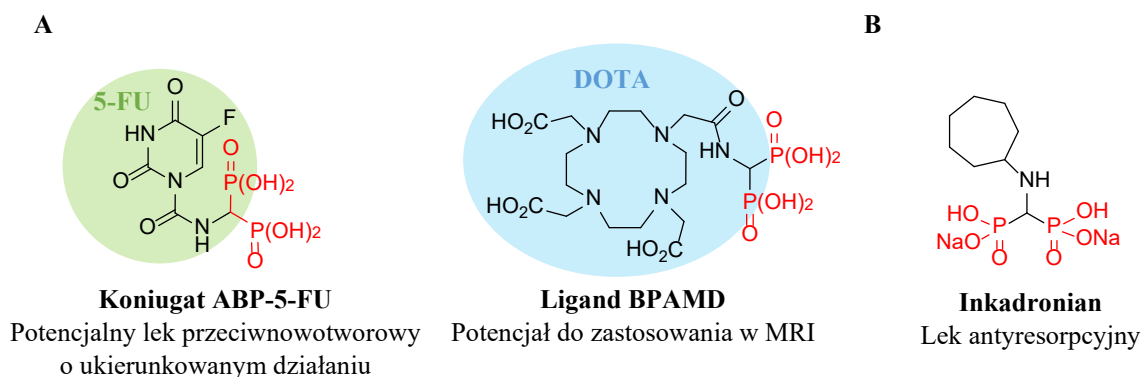
Rys. 1.1. Porównanie struktur pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych (opracowanie własne)

Fig. 1.1. Comparison of the structures of 1-amino-1,1-bisphosphoric derivatives

¹ Dominika.Kozicka@polsl.pl, Katedra Chemii Organicznej, Bioorganicznej i Biotechnologii, Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska, Centrum Biotechnologii Politechniki Śląskiej.

² Anna.Kuźnik@polsl.pl, Katedra Chemii Organicznej, Bioorganicznej i Biotechnologii, Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska, Centrum Biotechnologii Politechniki Śląskiej.

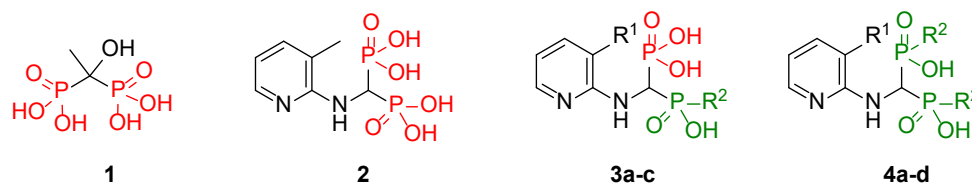
Najbardziej znaną i najlepiej przebadaną klasą pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych są 1-amino-1,1-bisfosfoniany. Związki te są czynnikami chelatującymi i przez ich zdolność do oddziaływania z jonami wapnia obecnymi w strukturze hydroksyapatytu (HA) wykazują silne powinowactwo do tkanki kostnej [1]. Dzięki tej właściwości α -aminobisfosfoniany są wykorzystywane w syntezie leków [2, 3] czy też środków kontrastowych [4-6] o ukierunkowanym działaniu, gdzie pełnią funkcję liganda kierującego terapeutyk do tkanki kostnej (rys. 1.2). Obecność reaktywnej grupy aminowej w strukturze α -amino-bisfosfonianów dodatkowo ułatwia proces koniugacji. Pochodne 1-amino-1,1-bisfosfonianów znane są również z uwagi na ich wysoką i wielokierunkową aktywność biologiczną. Związki te wykazują bowiem aktywność antyresorpcyjną [7], przeciwbakteryjną [8], przeciwwirusową [9] oraz przeciw pasożytniczą [10]. Najbardziej znany przedstawiciel tej klasy związków – inkadronian – już od ponad 20 lat jest dostępny na japońskim i chińskim rynku farmaceutycznym jako skuteczny lek o działaniu antyresorpcyjnym (rys. 1.2).



Rys. 1.2. A. Struktury koniugatów 1-amino-1,1-bisfosfonianu z 5-fluorouracylem (5-FU) oraz ligandem DOTA. B. Struktura inkadronianu (opracowanie własne)
Fig. 1.2. A. Structures of 1-amino-1,1-bisphosphonate conjugates with 5-fluorouracil and DOTA ligand. B. Structure of incadronate

Chociaż właściwości i aktywność biologiczna symetrycznych 1-amino-1,1-bisfosfonianów są dobrze znane i związki te znalazły wiele zastosowań, potencjał niesymetrycznych fosfonowo-fosfinowych oraz fosfonowo-fosfinoilowych pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych nie został jeszcze w pełni odkryty. Związki te były jak dotąd znacznie rzadziej badane, czego przyczyną może być ich mniejsza dostępność, wynikająca z konieczności prowadzenia ich syntezy etapowo, aby umożliwić wprowadzenie do cząsteczki dwóch różnych grup fosforowych. W literaturze nie odnaleziono wielu informacji na temat aktywności biologicznej tych pochodnych. Jedynym doniesieniem wskazującym na potencjał biologiczny tych związków jest badanie inhibicji wzrostu kryształów hydroksyapatytu przez pochodne **2-4** (rys. 1.3) [11]. Badania tego typu wykorzystywane są często do wstępnej oceny zdolności oddziaływania badanego związku ze strukturą kostną, co może wskazywać na jego potencjalne działanie antyresorpcyjne. Zbadano zdolność do inhibicji wzrostu kryształów HA niesymetrycznych pochodnych fosfonowo-fosfinowych **3** i symetrycznych pochodnych

2 oraz **4** w odniesieniu do etydronianu **1** (rys. 1.3) – bisfosfonianu I generacji o potwierdzonej aktywności antyresorpcyjnej, szeroko stosowanego w leczeniu osteoporozy i innych chorób kości. Przeprowadzone badania *in vitro* wykazały, że zdolność do hamowania wzrostu kryształów hydroksyapatytu miały wyłącznie symetryczny bisfosfonian **2** oraz fosfonowo-fosfinowe pochodne **3**. Warto podkreślić jednak, że niesymetryczne pochodne **3** okazały się o ponad rząd wielkości słabsze w hamowaniu wzrostu kryształów HA w porównaniu z odpowiednim bisfosfonowym analogiem **2** oraz referencyjnym związkiem **4** (tabela 1). Badania *in vivo* na szczurzym modelu TPTX (model resorpcji kości stymulowanej parathormonem) z udziałem pochodnych **2** oraz **3a** również wskazały na niższą aktywność pochodnej fosfonowo-fosfinowej (tabela 1). Słabsze powinowactwo do HA pochodnych fosfonowo-fosfinowych może być jednak cechą pożądaną, szczególnie w sytuacji, gdy wysokie powinowactwo do tkanki kostnej i silne efekty chelatujące symetrycznych bisfosfonianów są powodem ich toksyczności. Wiedza ta może być wówczas wykorzystana w projektowaniu terapeutyków o odpowiednim potencjale antyresorpcyjnym.



Rys. 1.3. Struktury pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych poddanych badaniu ich zdolności do inhibicji wzrostu kryształów HA (opracowanie własne)

Fig. 1.3. Structures of 1-amino-1,1-bisphosphoric derivatives examined for their ability to inhibit HA crystal growth

Tabela 1

Hamowanie wzrostu kryształów HA przez pochodne 1-amino-1,1-bisfosforowe **2-4**

Związek			HA-CGI ^a	TPTX (LED) ^b mg/kg
Nr	R ¹	R ²		
2	Me	-	1.3	0.001
3a	Me	Me	27.5	1.0
3b	Me	Bu	26.9	-
3c	H	Me	30.5	-
4a	Me	Me	brak aktywności	-
4b	Me	Bu	brak aktywności	-
4c	H	Me	brak aktywności	-
4d	H	Bu	brak aktywności	-

^aHA-CGI – inhibicja wzrostu kryształów HA. Dane podane jako stężenie $\times 10^{-6}$ M wymagane do zahamowania tworzenia się kryształów hydroksyapatytu w ciągu 50 minut w przesyconym medium. Dane zostały znormalizowane względem etydronianu **1**, dla którego wartość HA-CGI wynosi 1.0.

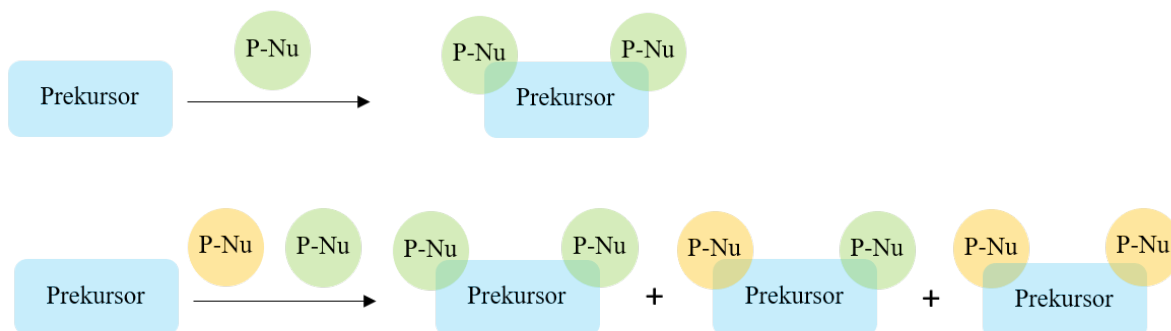
^bLED – (ang. lowest effective dose), najniższa dawka skuteczna (mg/kg).

Źródło: opracowanie własne na podstawie [11]

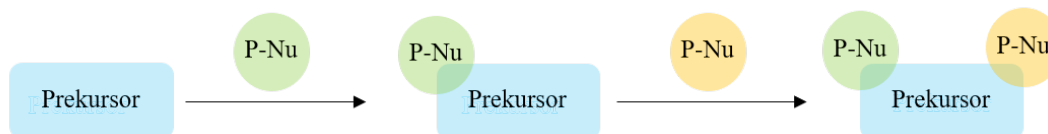
2. Metody syntezy niesymetrycznych pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych

Wśród opisanych w literaturze strategii syntezy pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych zdecydowana większość opisanych metod polega na równoczesnym wprowadzaniu obydwu grup fosforowych, co prowadzi najczęściej do otrzymania symetrycznych α -aminobisfosfonianów [12]. Jednoetapowe procedury również umożliwiają otrzymywanie niesymetrycznych analogów bisfosforowych, w przypadku gdy w reakcji zastosowane zostaną dwa różne nukleofile fosforowe (P-Nu). Strategia ta nie jest jednak powszechnie stosowana w syntezie niesymetrycznych pochodnych, ponieważ prowadzi do otrzymania nie tylko niesymetrycznych, lecz także symetrycznych produktów, a rozdział tak uzyskanych mieszanin może być kłopotliwy. Synteza fosfonowo-fosfinowych oraz fosfonowo-fosfinoilowych pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych przebiega najczęściej z zastosowaniem metod sekwencyjne, które polegają na następczym wprowadzaniu obydwu grup fosforowych do różnego rodzaju prekursorów. Takie podejście, choć wiąże się z koniecznością przeprowadzenia większej liczby reakcji i może doprowadzić w rezultacie do obniżenia sumarycznej wydajności syntezy, umożliwia jednak otrzymanie oczekiwanego produktu w sposób selektywny (schemat 2.1).

Metoda równoczesna



Metoda sekwencyjna



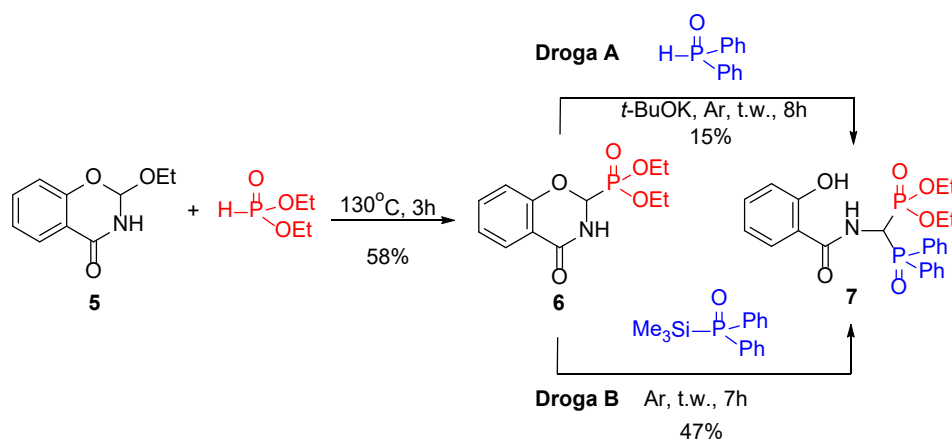
Schemat 2.1. Podział metod syntezy pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych na równoczesne i sekwencyjne (opracowanie własne)

Scheme 2.1. Division of the procedures for 1-amino-1,1-bisphosphoric derivatives synthesis into simultaneous and sequential

Należy podkreślić, że przydatność większości opisanych w literaturze metod otrzymywania niesymetrycznych analogów 1-aminobisfosforowych została wykazana dla ograniczonej liczby zsyntetyzowanych modeli, bardzo często pojedynczych. Do tej pory nie opracowano ogólnej i efektywnej metody ich otrzymywania.

2.1. Metody syntezy fosfonowo-fosfinoilowych pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych

Jedną z pierwszych opisanych w literaturze metod prowadzących do otrzymania fosfonowo-fosfinoilowej pochodnej 1-amino-1,1-bisfosforowej jest procedura syntezy 1-(*N*-salicyloiloamino)-1-(difenylfosfinoilo)metylofosfonianu dietylu **7** opisana przez *Kostkę* i *Kotyńskiego* w 1990 roku [13]. Metoda ta polegała w pierwszym etapie na reakcji 2-etoksy-2,3-dihydro-4*H*-1,3-benzoksazyn-4-onu **5** z fosforynem dietylu w podwyższonej temperaturze, w wyniku czego otrzymano monofosfonową pochodną **6** z wydajnością 58%. Związek ten poddano następnie reakcji z tlenkiem difenylofosfiny w obecności *tert*-butanolanu potasu (schemat 2.2, droga A), uzyskując oczekiwany bisfosforowy analog **7** z wydajnością zaledwie 15%. Trzy lata później ci sami autorzy zaproponowali alternatywną metodę transformacji monofosfonowego analogu **6** w pochodną bisfosforową **7**. Tym razem związek **6** poddano reakcji z tlenkiem difenyl(trimetylosililo)fosfiny, a oczekiwany produkt **7** uzyskano z wyższą wydajnością, wynoszącą 47% (schemat 2.2, droga B) [14].

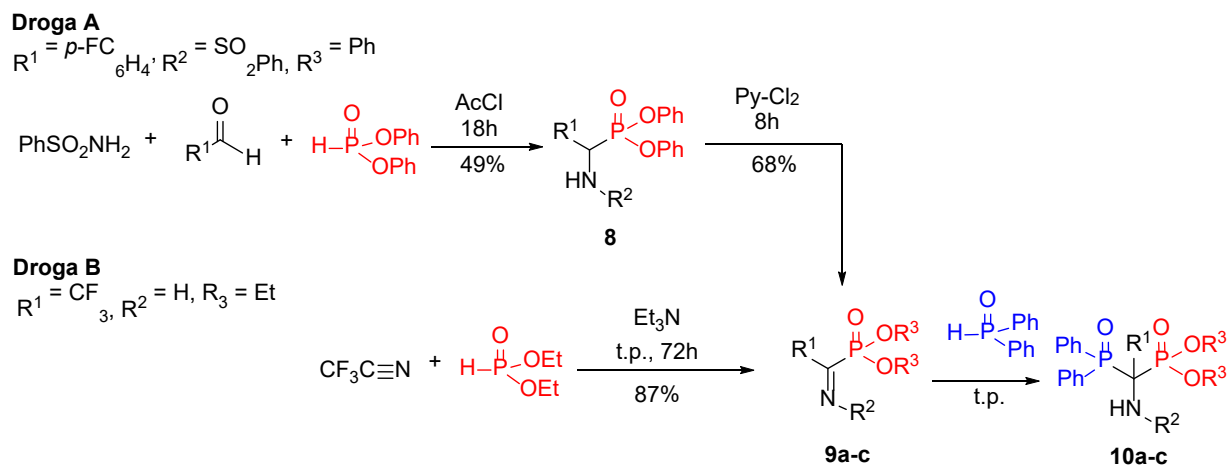


Schemat 2.2. Synteza 1-(*N*-salicyloiloamino)-1-(difenylfosfinoilo)metylofosfonianu dietylu (opracowanie własne na podstawie [13-14])

Scheme 2.2. Synthesis of diethyl 1-(*N*-salicyloylamino)-1-(diphenylphosphinoyl)methylphosphonate

Inna metoda syntezy pochodnych fosfinoilo-fosfonowych została opisana przez grupę *Rassukana* i polega na reakcji tlenku difenylofosfiny z pochodnymi iminofosfonowymi **9a-c**, aktywowanymi obecnością grupy *p*-fluorofenyłowej [15], trifluorometyłowej [16] lub heptafluoropropyłowej [17] przy atomie węgla α . W przypadku pochodnej **9a** na zwiększoną reaktywność wiązania C=N wpływała również elektroujemność obecnej w strukturze grupy sulfonyloimidoilowej. Oczekiwane produkty **10a-c** otrzymano z wydajnościami 60-91% (tabela 2). Wyjściowe pochodne iminofosfonowe **9a,b** uzyskano w wyniku reakcji trifluoroacetonitrylu z fosforynem dietylu prowadzonej w obecności trietyloaminy (schemat 2.3, droga B, wydajność **9b** 87%) [16] lub w wyniku trójskładnikowej kondensacji *p*-fluorobenzaldehydu, benzenosulfonamidu oraz fosforynu difenyłu w obecności chlorku

acetylu, pełniącego funkcję czynnika kondensującego, a następnie utleniania tak uzyskanej pochodnej **8** w układzie pirydyna-Cl₂ (schemat 2.3, droga A, wydajność **9a** 68%) [15]. Metoda syntezy pochodnej **9c** nie została opisana.



Schemat 2.3. Reakcja tlenku difenylofosfiny z pochodnymi iminofosfonowymi aktywowanymi przy atomie węgla C α (opracowanie własne na podstawie [15-17])

Scheme 2.3. Reaction of diphenylphosphine oxide with iminophosphonate derivatives activated at the α -carbon atom

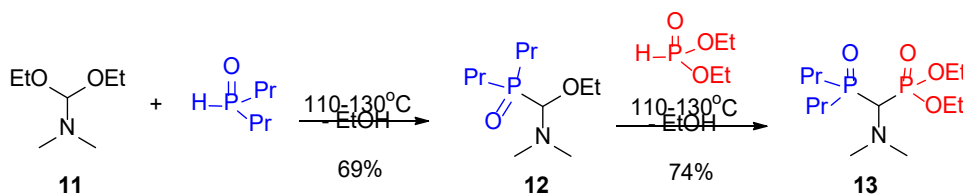
Tabela 2

Wydajność otrzymywania fosfonowo-fosfinoilowych pochodnych **10**

Nr	R ¹	R ²	R ³	Wydajność 10 , %
a	<i>p</i> -FC ₆ H ₄	SO ₂ Ph	Ph	91
b	CF ₃	H	Et	60
c	C ₃ F ₇	H	Et	81

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [15-17]

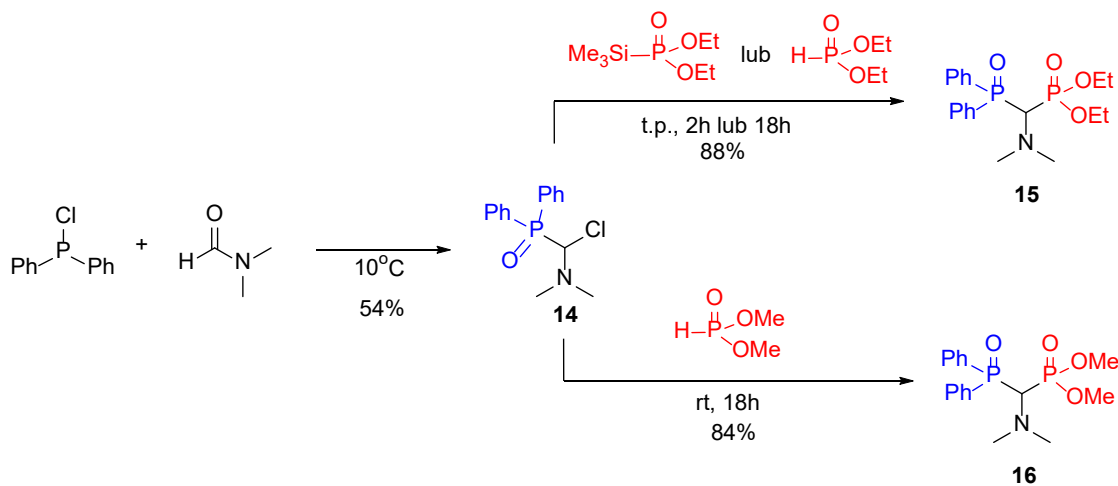
Odmianna metoda syntezy pochodnych fosfonowo-fosfinoilowych polega na reakcji fosforynu dialkilu z *N,N*-dialkiloaminowymi pochodnymi tlenku fosfiny funkcjonalizowanymi w pozycji α grupą nukleofugową, taką jak chlor [18] czy grupa etoksylova [19]. Przykładem takiej metody jest opisana przez zespół *Prishchenko* w 2009 roku dwuetapowa synteza 1-(*N,N*-dimetyloamino)-1-(dipropylofosfinoilo)metylidenofosfonianu dietylu **13** z acetalu dietylowego *N,N*-dimetyloformamidu **11** (schemat 2.4). Metoda ta polegała na podstawieniu grup etoksylowych acetalu **11** grupą dipropylofosfinoilową (wydajność **12** 69%), a następnie dietoksyfosfonową (wydajność **13** 74%) w reakcjach typu *Michaelisa-Beckera* z udziałem tlenku dipropylofosfiny oraz fosforynu dietylu [19].



Schemat 2.4. Otrzymywanie 1-(N,N-dimetyloamino)-1-(dipropylofosfinoilo)metylofosfonianu dietylu z acetalu dietylowego N,N-dimetyloformamidu. [Opracowanie własne na podstawie [19]]

Scheme 2.4. Preparation of diethyl 1-(N,N-dimethylamino)-1-(dipropylphosphino)phosphonate from N,N-dimethylformamide diethyl acetal

Zespół *Morgalyuk* opisał syntezę pochodnych fosfonowo-fosfinoilowych **15** oraz **16** w reakcji *N,N*-dialkiloaminowej pochodnej tlenku difenylofosfiny, funkcjonalizowanej w pozycji α inną grupą nukleofugową, a mianowicie atomem chloru, z (trimetylosililo)-fosfonianem dietylu lub fosforynami dialkylu w reakcjach typu *Michaelisa-Arbuzowa* lub *Michaelisa-Beckera* (Schemat 2.5) [18]. W odróżnieniu od klasycznego wariantu reakcji typu *Michaelisa-Beckera*, reakcja tlenku 1-chloro-1-(*N,N*-dimetyloamino)metylodifenylofosfiny **14** z fosforynami dialkylu nie wymagała obecności silnej zasady w środowisku reakcyjnym, zachodziła ona spontanicznie z zauważalnym wydzieleniem ciepła. Wyjściową monofosfinoilową pochodną **14** uzyskano w autokatalitycznej reakcji z udziałem *N,N*-dimetyloformamidu i chlorodifenylofosfiny.



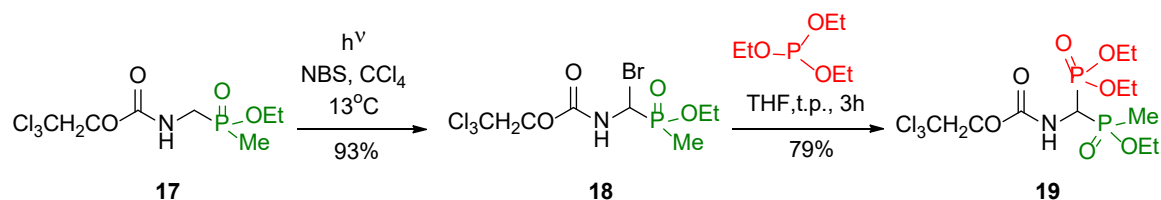
Schemat 2.5. Synteza pochodnych fosfonowo-fosfinoilowych z *N,N*-dialkiloaminowej pochodnej tlenku difenylofosfiny, funkcjonalizowanej w pozycji α atomem chloru. [Opracowanie własne na podstawie [18]]

Scheme 2.5. Synthesis of phosphonyl-phosphino derivatives from *N,N*-dialkylamine derivative of diphenylphosphine oxide, functionalized at the α position with a chlorine atom

2.2. Metody syntezy fosfonowo-fosfinowych pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych

Jedną z pierwszych poznanych metod otrzymywania fosfonowo-fosfinowych pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych była procedura syntezy *N*-zabezpieczonego 1-[etoksy(metylofosfinylo)]metylofosfonianu dietylu **19**, opisana przez *Schradera* i *Steglicha*

w 1989 roku [20]. Metoda ta polega w pierwszym etapie na poddaniu wyjściowego *N*-(2,2,2-trichloroetyloksykarbonyloamino)metylofosfinianu **17** reakcji α -bromowania z udziałem *N*-bromoimidu kwasu bursztynowego (NBS), w celu aktywowania pozycji α wyjściowego związku. Reakcję tę prowadzono w obniżonej temperaturze, otrzymując produkt **18** z wydajnością 93%. Tak aktywowaną pochodną poddano następnie reakcji typu *Michaelisa-Arbuzowa* z fosforynem trietylu, w wyniku czego otrzymano oczekiwany produkt **19** z wydajnością 79% (schemat 2.6). Stosunek diastereomeryczny uzyskanych pochodnych nie został podany.

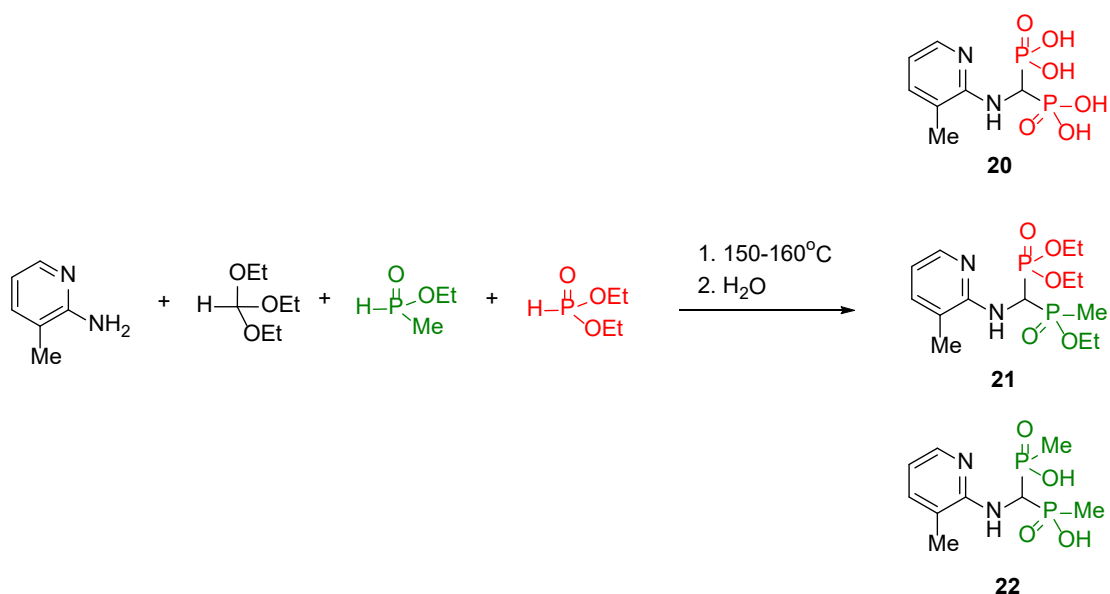


Schemat 2.6. Synteza fosfonowo-fosfinowego analogu 1-amino-1,1-bisfosfonianu z *N*-zabezpieczonego metylofosfinianu aktywowanego w pozycji α atomem bromu (opracowanie własne na podstawie [20])

Scheme 2.6. Synthesis of the phosphonyl-phosphinyl analog of 1-amino-1,1-bisphosphonate from *N*-protected methylphosphinate activated at the α position with a bromine atom.

Synteza oraz badaniem właściwości fosfonowo-fosfinowych pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych zajmował się również zespół *Ebetino*, któremu udało się z powodzeniem zsyntezować kwas 1-[*N*-(3-metylo-2-pirydynylo)amino]-1-[(hydroksy)metylofosfinylo]-metylofosfonowy **21**. Grupa ta opisała syntezę tego związku z wykorzystaniem metody zarówno równoczesnej [21], jak i sekwencyjnej [11].

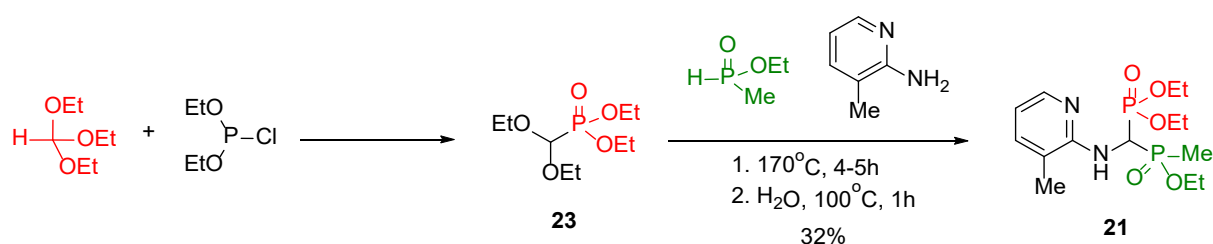
Pierwsza metoda, równoczesna, polega na jednoetapowej reakcji kondensacji 2-amino-3-metylopirydyny z ortomrówczanem trietylu, metylofosfinianem etylu oraz fosforynem dietylu. Ze względu na fakt, że przyłączanie grupy fosfonowej oraz fosfinowej następowało w tym samym etapie, w wyniku reakcji otrzymano mieszaninę symetrycznych oraz niesymetrycznych produktów **20-22** (schemat 2.7). Po rozdziale chromatograficznym oraz następczej hydrolizie wydzielono oczekiwaną fosfonowo-fosfinową pochodną **21** z wydajnością 17%. Stosunek diastereomeryczny otrzymanych produktów w tym przypadku również nie został podany [21].



Schemat 2.7. Synteza kwasu 1-[N-(3-metylo-2-pirydynylo)amino]-1-[(hydroksy)metylofosfinylo]metylofosfonowego metodą równoczesną. [Opracowanie własne na podstawie [21]]

Scheme 2.7. Synthesis of 1-[N-(3-methyl-2-pyridyl)amino]-1-[(hydroxy)methylphosphinyl]methylphosphonic acid by the simultaneous method

Druga opisana metoda syntezy pochodnej **21** była strategią etapową i pozwoliła na selektywne wprowadzenie ugrupowania fosfonowego, a następnie fosfinowego, dzięki czemu produkty uboczne **20** oraz **22** nie powstawały. Opracowana metoda obejmowała syntezę dietoksymetylofosfonianu dietylu **23** w reakcji ortomrówczanu trietylu z chlorofosforynem dietylu w pierwszym etapie [21], a następnie reakcją kondensacji tak uzyskanej pochodnej **23** z 2-amino-3-metylopirydyną oraz metylofosfinianem etylu w drugim etapie. Po przeprowadzeniu hydrolizy uzyskano oczekiwany kwas 1-[N-(3-metylo-2-pirydynylo)amino]-1-[(hydroksy)metylofosfinylo]metylofosfonowy **21** z wydajnością 32% (schemat 2.8) [11].

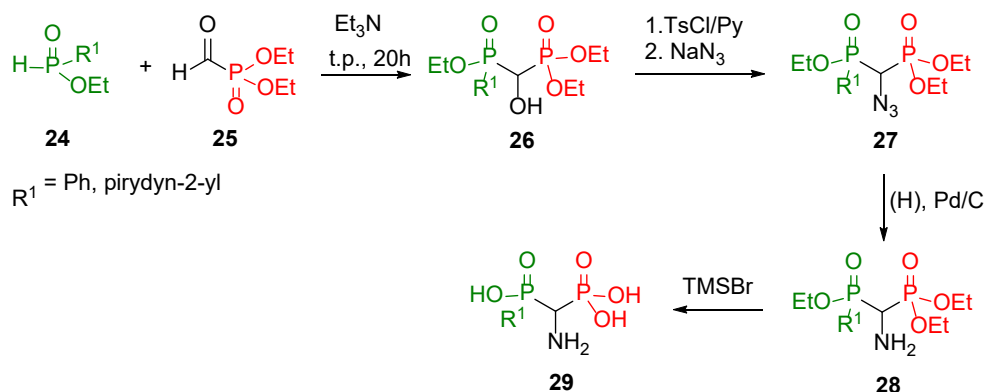


Schemat 2.8. Synteza kwasu 1-[N-(3-metylo-2-pirydynylo)amino]-1-[(hydroksy)metylofosfinylo]metylofosfonowego metodą sekwencyjną (opracowanie własne na podstawie [11, 21])

Scheme 2.8. Synthesis of 1-[N-(3-methyl-2-pyridyl)amino]-1-[(hydroxy)methylphosphinyl]methylphosphonic acid by the sequential method.

W 2003 roku opatentowano czteroetapową metodę syntezy dwóch modeli kwasów 1-aminofosfinylo-metylofosfonowych **29** przez odpowiednie pochodne azydkowe **27**. Metoda ta obejmowała: (i) reakcję kondensacji estru etylowego kwasu fenylofosfinowego **24** z estrem dietylowym kwasu formylofosfonowego **25** w obecności trietyloaminy w pierwszym etapie, (ii) przekształcenie tak uzyskanej α -hydroksylowej pochodnej **26** w pochodną

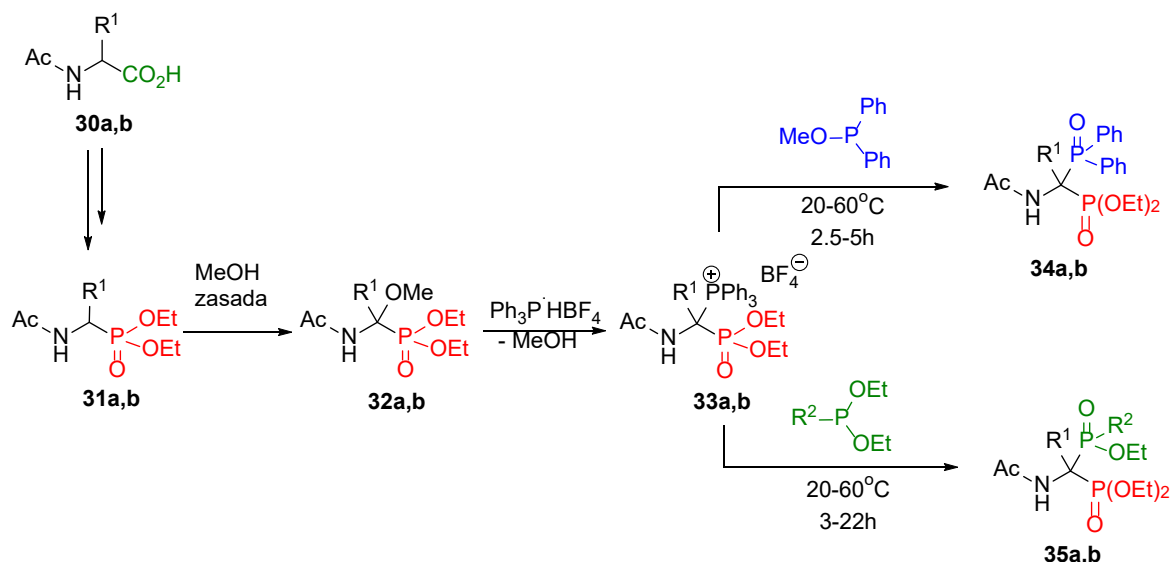
azydkową **27** w reakcji tosylowania w układzie TsCl/Py, a następnie reakcji substytucji z udziałem azydku sodu, (iii) redukcję grupy azydkowej analogu **27** prowadzoną wobec katalizatora palladowego oraz (iv) hydrolizę tak uzyskanej pochodnej **28** w reakcji z udziałem bromku trimetylosililu (schemat 2.9). Danych dotyczących wydajności oraz stosunku diastereomerycznego uzyskanych produktów nie podano [22].



Schemat 2.9. Synteza kwasów 1-aminofosfinyłometylofosfonowych poprzez pochodne azydkowe (opracowanie własne na podstawie [22])

Scheme 2.9. Synthesis of 1-aminophosphinylmethylphosphonic acids *via* azide derivatives

W 2015 *Kuźnik* i współp. opisali trój etapową metodę otrzymywania fosfonowo-fosfinowych oraz fosfonowo-fosfinoilowych analogów 1-amino-1,1-bisfosforowych z *N*-zabezpieczonych alkilofosfonianów **31** przez odpowiednie sole tryfenylofosfoniowe **33**. Metoda ta obejmowała aktywowanie monofosfonowych pochodnych **31** w reakcji elektrochemicznego utleniania, przekształcenie tak uzyskanych α -metoksylowych pochodnych **32** w sole fosfoniowe **33** w reakcji z tetrafluoroboranem tryfenylofosfoniowym oraz ich następczą transformację z udziałem difenylofosfininu metylu lub fenylofosfininu dietylu w reakcji typu *Michaelisa-Arbuzowa*, prowadzonej w obecności katalitycznych ilości zasady *Hüniga* oraz jodku metylotryfenylofosfoniowego (schemat 2.10). Oczekiwane produkty **34-35** otrzymano z wydajnościami 50-76% (tabela 3) w przypadku analogów fosfonowo-fosfinowych **35** jako mieszaniny diastereoizomerów w stosunkach 1,4:1 lub 1:1. Wyjściowe *N*-zabezpieczone alkilofosfoniany **31** mogą być w efektywny sposób otrzymane z *N*-zabezpieczonych aminokwasów **30** [23].



Schemat 2.10. Transformacja N-zabezpieczonych alkilofosfonianów w fosfonowo-fosfinowe oraz fosfonowo-fosfinoilowe pochodne 1-amino-1,1-bisfosforowe przez odpowiednie sole tryfenylofosfoniowe (opracowanie własne na podstawie [23])

Scheme 2.10. Transformation of N-protected alkylphosphonates into phosphonyl-phosphinoyl and phosphonyl-phosphinoyl 1-amino-1,1-bisphosphoric derivatives via the corresponding triphenylphosphonium salts

Metoda ta ma jednak znaczące ograniczenie – może być wykorzystana jedynie w syntezie analogów 1-amino-1,1-bisfosforowych będących pochodnymi glicyny i alaniny ($R^1 = \text{H}, \text{Me}$). Próby przeprowadzenia elektrochemicznego utleniania fosfonowych pochodnych **31** aminokwasów innych niż glicyna i alanina, jak np. walina czy fenyloalanina nie powiodły się, przypuszczalnie ze względu na zawadę steryczną powodowaną przez obecność rozbudowanych podstawników przy atomie węgla w pozycji α [23].

Tabela 3

Wydajność otrzymywania produktów w transformacji analogów **31** w niesymetryczne pochodne 1-amino-1,1-bisfosforowe

Nr	R^1	Wydajność, %			
		32	33	34	35 (dr)
a	Me	72	93	76	53 (1:1.4)
b	H	88	77	68	$R^2 = \text{Me}$ 50 (1:1)
					$R^2 = \text{Ph}$ 51 (1:1.4)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [23]

Bibliografia

1. Russell R.G.G.: Bisphosphonates: The first 40 years, *Bone*, 2011, 49, 2–19.
2. Farrell K. B., Karpeisky A., Thamm D.H., Zinnen, S.: Bisphosphonate conjugation for bone specific drug targeting, *Bone Rep.*, 2018, 9, 47–60.
3. Sun S. *et al.*: Bisphosphonates for delivering drugs to bone, *Br. J. Pharmacol.*, 2021, 178, 2008–2025.
4. Palma E., Correia J.D.G., Campello M.P.C., Santos I.: Bisphosphonates as radionuclide carriers for imaging or systemic therapy, *Mol. BioSyst.*, 2011, 7, 2950.
5. Zha Z. *et al.*: A New [⁶⁸Ga]Ga-HBED-CC-Bisphosphonate as a Bone Imaging Agent, *Mol. Pharm.*, 2020, 17, 1674–1684.
6. Kubiček V. *et al.*: A Bisphosphonate Monoamide Analogue of DOTA: A Potential Agent for Bone Targeting, *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, 127, 16477–16485.
7. Komatsubara S. *et al.*: Long-Term Treatment of Incadronate Disodium Accumulates Microdamage but Improves the Trabecular Bone Microarchitecture in Dog Vertebra, *J. Bone Miner. Res.*, 2003, 18, 512–520.
8. Kosikowska P. *et al.*: Bisphosphonic acids as effective inhibitors of *Mycobacterium tuberculosis* glutamine synthetase, *J. Enzyme Inhib. Med. Chem.*, 2016, 31, 931–938.
9. Lachay C.M. *et al.*: Modular Assembly of Purine-like Bisphosphonates as Inhibitors of HIV-1 Reverse Transcriptase, *J. Med. Chem.*, 2014, 57, 7435–7449.
10. Ghosh S. *et al.*: Effects of Bisphosphonates on the Growth of *Entamoeba histolytica* and *Plasmodium* Species in Vitro and in Vivo, *J. Med. Chem.*, 2004, 47, 175–187.
11. Ebetino F.H., Jamieson, L.A.: The Design and Synthesis of Bone-Active Phosphinic Acid Analogues: 1. The Pyridylaminomethane Phosphonoalkylphosphinates, *Phosphorus, Sulfur Silicon Relat. Elem.*, 1990, 51, 23–26.
12. Chmielewska E., Kafarski P.: Synthetic Procedures Leading towards Aminobisphosphonates, *Molecules*, 2016, 21, 1474.
13. Kostka K., Kotyński A.: DIETHYL 2,3-DIHYDRO-4H-1,3-BENZOXAZIN-4-ONE-2-PHOSPHONATE AND ITS REACTIONS. *Phosphorus, Sulfur Silicon Relat. Elem.*, 1990, 47, 261–265.
14. Kostka, K., Kotyński A.: THE REACTIONS OF DIETHYL 2,3-DIHYDRO-4H-1,3-BENZOXAZIN-4-ONE-2-PHOSPHONATE WITH NUCLEOPHILES. *Phosphorus, Sulfur Silicon Relat. Elem.*, 1993, 83, 215–221.
15. Rassukana Y.V., Sinitsa A.A., Onysko P.P.O, O Diphenyl *N*-sulfonylbenzimidoylphosphonates, a novel type of C-phosphorylated imines, *Russ. Chem. Bull.*, 2005, 54, 2652-2655.
16. Rassukana Y.V., Kolotylo M.V., Sinitsa O.A., Pirozhenko V.V., Onys'ko Petro P.: α -Iminotrifluoroethylphosphonates: The First Representatives of N–H Imidoyl Phosphonates, *Synthesis*, 2007, 17, 2627–2630.

17. Rassukana Y.V., Yelenich I.P., Onys'ko P.P.: Fluorinated NH-iminophosphonates in synthesis of biorelevant α -aminophosphonic acids derivatives, *Ukr. Bioorg. Acta*, 2022, 17, 101-104.
18. Morgalyuk V.P., Strelkova T.V., Nifant'ev E.E.: Ambident Reactivity of Chloro-(dialkylamino)(diphenylphosphinoyl)methanes, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 2012, 85, 93–100.
19. Prishchenko A.A., Livantsov M.V., Novikova O.P., Livantsova L.I., Petrosyan V.S.: Synthesis of the new types of *N*-substituted aminomethylenebisorganophosphorus acids and their derivatives, *Heteroatom Chem.*, 2009, 20, 319–324.
20. Schrader T., Steglich W.: Phosphoranaloge von Aminosäuren II. Synthese von α -Aminophosphonsäuren Und α -Aminophosphinsäuren, Ausgehend von Den Entsprechenden *N*-Acylimino-Derivaten, *Synthesis*, 1989, 97–101.
21. Ebetino F.H., Berk J.D.: A stereoselective process for the preparation of novel phosphonoalkylphosphinates, *J. Organomet. Chem.*, 1997, 529, 135–142.
22. Metcalf C.A. III, Shakespeare W.C., Sawyer T.K., Wang Y., Bohacek R.: Novel Pyridopyrimidones and Uses Thereof, patent amerykański, WO 03/000270 A1, 2003.
23. Kuźnik A. *et al.*: A new method for the synthesis of α -aminoalkylidenebisphosphonates and their asymmetric phosphonyl-phosphinyl and phosphonyl-phosphinoyl analogues, *Beilstein J. Org. Chem.*, 2015, 11, 1418–1424.

NIESYMETRYCZNE FOSFONOWO-FOSFINOWE ORAZ FOSFONOWO-FOSFINOILOWE POCHODNE 1-AMINO-1,1-BISFOSFOROWE I METODY ICH SYNTEZY

Streszczenie

Pochodne 1,1-bisfosforowe cieszą się niesłabnącym zainteresowaniem naukowców nieustannie od wielu lat. Wynika to z ich wysokiej i różnokierunkowej aktywności biologicznej, za którą jest w dużym stopniu odpowiedzialna obecność szkieletu P-C-P w ich strukturze, zapewniającego im stabilność enzymatyczną w organizmie oraz wysokie powinowactwo do tkanki kostnej. Ważną podklasą pochodnych 1,1-bisfosforowych, o dobrze poznanej aktywności biologicznej, są 1-amino-1,1-bisfosfoniany. Równie interesująca może okazać się inna grupa związków 1-amino-1,1-bisfosforowych, a mianowicie ich niesymetryczne pochodne. Takie związki były dotychczas jednak znacznie mniej badane, stąd ich potencjał nie jest jeszcze w pełni odkryty. Niniejsza praca stanowi przegląd dostępnych doniesień literaturowych na temat właściwości niesymetrycznych fosfonowo-fosfinowych oraz fosfonowo-fosfinoilowych pochodnych 1-amino-1,1-bisfosforowych oraz metod ich syntezy.

Słowa kluczowe: bisfosfoniany, α -aminobisfosfoniany, pochodne α -aminobisfosforowe

**ASYMMETRICAL PHOSPHONYL-PHOSPHINYL AND PHOSPHONYL-
PHOSPHINOYL 1-AMINO-1,1-BISPHOSPHORIC DERIVATIVES
AND METHODS FOR THEIR SYNTHESIS**

Abstract

1,1-Bisphosphoric derivatives have been of unflagging interest to scientists for many years. This is due to their high and multidirectional biological activity, which is largely determined by the presence of the P-C-P backbone, which provides them with enzymatic stability and high affinity for bone tissue. An important subclass of 1,1-bisphosphoric derivatives are 1-amino-1,1-bisphosphonates with well-known biological activity. Equally interesting may be another group of 1-amino-1,1-bisphosphoric compounds, namely their asymmetrical derivatives. However, such compounds have been studied much less extensively so far, so their potential has not yet been fully discovered. This article reviews available literature reports on the properties of asymmetric phosphonyl-phosphinyl and phosphonyl-phosphinoyl 1-amino-1,1-bisphosphoric derivatives and methods for their synthesis.

Keywords: bisphosphonates, α -aminobisphosphonates, α -aminobisphosphoric derivatives

Kamil KUCHARSKI¹

CHARACTERISTICS OF THE ABRASIVES USED IN GRINDING OF SPIRAL BEVEL GEARS

1. Introduction

Spiral bevel gears were invented many years ago; however, they are still the basic element of energy transfer and the movement of mechanisms used in the automotive and aviation industries. The spiral bevel gears are responsible for transferring power between the engine and the wheels on the axles. In addition, they are gaining importance in the context of electrification and hybridisation of means of transport. Bevel gears play an important role in aviation. In helicopters, they form a kinematic chain connection between the main rotor and the tail rotor. In aircrafts, they are an element of turbine engines and mechanisms such as starters, flap actuators, etc. Similarly, in sea transport, spiral bevel gears are responsible for transferring power from the engine to the propeller and rudder [1-4].

In addition to the many benefits and variety of applications, spiral bevel gears are one of the most advanced design and construction types of gears and require significant engineering skills. The use of various production methods allows one to obtain the appropriate tooth shape and the appropriate characteristics for the planned applications [5-8].

Standard production of spiral bevel gears involves roughing of the material in the unhardened condition. It is then subjected to heat treatment and, in the last stage, to finishing in the grinding process. The production process requires that production plants have an extensive machinery park. The costs of investment, depreciation, and operation of the machines necessary for the production of spiral bevel gears mean that the break-even point occurs in large series or mass production, limiting the possibilities of piece and small lot production [9-10].

Various methods are used in industry to produce spiral bevel gears. In 1910, a face hob cutter with continuous indexing was used for the first time; in 1927 the first patent for hypoid gears was approved, and 61 years later the first machine producing both face mill and face hob gears appeared. The most modern solutions are Face Mill (Single Indexing) and Face Hob (Continuous indexing) [11]. The growing capabilities of multiaxis CNC machine tools enable industrial plants to prepare semi-finished products and roughen the toothing of spiral bevel gears [12].

¹ k.kucharski@prz.edu.pl, Doctoral School of the Rzeszów University of Technology, <https://gear-lab.prz.edu.pl>

The next stage in the production of spiral bevel gears is heat treatment carried out by sectional heating, where induction hardening, flame hardening, or laser hardening are used; in certain cases quench and temper are used as volume heating. In some cases, thermochemical processes are used, where the key operations are as follows: Carburising and hardening, Nitriding, Carbonitriding, Induction hardening [7, 13].

Increasing quality requirements have resulted in the development of finishing methods such as lapping, grinding, or skiving. Lapping is a finishing operation to improve surface finish and create tooth contact. During lapping, the bevel gear and the mating pinion gear are paired and work together under load. In lapping, it is not possible to finish only a specific part of the tooth, giving little control over the process. Skiving is a viable process for the hard finishing face hopped bevel gearsets. For this process, tools in the form of carbide blades or brazed on CBN (Cubic Boron Nitride) cutting strips are used to cut the hardened surface of the material. Grinding is a finishing method that provides the greatest control over the process and its final effect. This is a method that ensures high-quality finishing of the rough-cut tooth flanks of spiral bevel gears. The kinematics of the grinding process of the bevel gears has many features in common with the process of cutting spiral bevel gears. A dressed grinding wheel is used to grind, having a shape consistent with the generating surface. The geometry of the generating surface is identical to the geometry found in the gear milling process [9, 14, 15].

At the end of the last century, deep grinding technology appeared on the market, which consists of removing layers of material up to 10 mm thick and even more at slow cutting speeds in the range of 20-40 mm/min [16] and its variant High Efficiency Deep Grinding (HEDG) is defined as deep grinding at high work speeds and very high removal rates, reaching up to twice the cutting speed of standard deep grinding [17] indicated allow carrying out the entire process of machining bevel gears on one grinder. Processes are of particular importance for piece and small-lot production and, in some cases, medium-volume production. Due to the innovativeness of this method and the small group of recipients, access to data on the details of the process is difficult. It is an aggressive grinding process that can be used for rough grinding and finishing to achieve moderate levels of precision. With very high material removal rates, HEDG achieves specific grinding energies similar to those of conventional cutting processes [18]. Therefore, a properly configured HEDG can replace two or three machining operations; in the case of difficult-to-machine materials, the use of Deep Grinding with common cutting speeds also allows you to shorten the machining time, unfortunately generating high temperatures and can lead to burns, so the key to the optimal process is the appropriate selection of the grinding wheel and adapting the processing parameters to it [19, 20].

This paper focusses on abrasive materials that can be used to grind spiral bevel gears from solid material through deep grinding or high-efficiency deep grinding, which can also allow you to get closer to the desired parameters at a lower cost of tools and their characteristics. The paper is of a review character and is an introduction to research that enables us to determine the impact of the type of grinding wheel and the parameters of the grinding process on the

usable and functional properties of the gear. The first part of the work describes the grinding process, and then the materials used for the grinding wheels are discussed. Section 4 contains a description of the solutions offered by the manufacturers of grinding wheels. The article ends with a summary containing a proposal for further research directions.

2. Grinding

Spiral bevel gear grinding takes place only in a single indexing process (discontinuous indexing, motion kinematics as in face milling). The grinding wheels used for this process are made of abrasive material, binder, and mounting plate, allowing mounting on the grinder spindle. Because of their price-performance ratio, vitrified bonded wheels with sintered corundum abrasives are the main type used, with CBN grinding wheels for some applications. The size of the grinding wheel depends mainly on the size of the gear being machined; most often it is given in inches. Due to its structure and the forces acting during operation, the grinding wheel may break above the rotational speeds allowed by the FEPA (Federation of European Producers of Abrasives) standard or the ISO standard [21-23].



Fig. 1. Single indexing grinding on Klingelnberg G80

Rys. 1. Operacja szlifowania na szlifierce Klingelnberg G80

Source: <https://www.powertransmissionworld.com/grinding-of-bevel-gears-with-bigger-and-bigger-diameters/>

3. Grinding wheel materials

3.1. Grain

The materials most commonly used are [1, 24, 25]:

- Aluminium oxide, available in various compositions, is a very popular material, suitable for the machining of unhardened materials and hardened steels;
- Sintered corundum (also found under the name Sintered Aluminium Oxide) is used for grinding hardened steels, usually supplied with an open-pore binder, which allows the efficiency of the process to be increased through increased access of the coolant; it also has the ability to self-sharpen, which significantly extends the working time of a single-operation grinding wheel; sintered corundum is produced in a chemical process from aluminium oxide, after which it is dried and crushed and then sintered in many operations.
- Silicon carbide has higher hardness and lower ductility compared to aluminium oxides, and both light green silicon carbide, with exceptionally good cutting ability, and dark silicon carbide, which is extremely hard and less brittle, can be used; Silicon carbide has a high thermal conductivity, which makes it possible to grind heat-sensitive materials.
- Cubic Boron Nitride (CBN) has a high internal hardness of 4700 N/mm² according to Knoop (diamond hardness is 7000 N/mm²), extends the tool life and has high thermal stability.

Table 1

The most commonly used grains for bevel gear grinding

Abrasive	Grinding speed	Depth infeed	Dressing speed	Dressing removal	Applications
Aluminium oxide	15/30 m/s	0.05–0.15 mm	20–250 mm/min	0.1–0.2 mm	Unhardened and hardened steels
Sintered corundum	15–35 m/s	0.1–0.5 mm	100–400 mm/min	0.03–0.1 mm	High-power grinding of hardened steels
Silicon carbide	15–35 m/s	0.1–0.5 mm	20–300 mm/min	0.08–0.15 mm	High-alloyed and tough materials, titanium alloys
CBN	30–70 m/s	0.1–0.5 mm	100–300 mm/min (with vitrified bonded CBN)	0.005–0.01 mm (with vitrified bonded CBN)	High-power grinding of hardened steels

Source: own study based on [1].

3.2. Bond

The binder ensures cohesion and proper distribution of grains; for each of the materials discussed, the appropriate type of binder should be selected. The bond acquires its final properties during this process. The most commonly used binder for all of the indicated abrasives is vitrified bond, because it is the only type of binder with a controlled structure; therefore, with appropriate parameters, it can positively affect the supply of coolant to the machining zone and the transport of chips, which will avoid burns. In addition, it allows you to control the hardness of the grinding wheel and its structure. In addition, for Corundum and silicon carbide, the resinoid bond (B), the polyurethane bond (P), the rubber bond (R), the fibre-reinforced resinoid bond (BF) is used, and for the CBN resinoid bond (B), the brittle bronze bond (sintered metal bond), electroplated bond. The wheel is pressed into the form of a mould and then sintered in an oven. During this process, the bond between the materials acquires its final properties, which are described by successive characteristics [26-29].

3.3. Grit, Hardness, and Structure (Porosity)

Grit is a determination of grain size by assigning numbers to individual distributions that was determined on the basis of an international standard. For the grinding of the bevel gears, grit sizes are generally used from 60 (grit diameter 250–297 μm) to 120 (grain diameter 88–105 μm) are generally used. Finer grains are less brittle and more difficult to tear out of the binder, but they do not allow for efficient removal of chips, and because of them, we can obtain a low roughness of the machined surface. Coarse grinding wheels with larger grit are more efficient, give a rougher surface and wear faster, and the nature of the work of a given grinding wheel significantly affects the selection of grit [26-29].

Hardness refers to the ability of the bond to resist the breaking of the abrasive grain. The softer the wheel, the easier it is for the abrasion grain to break off. The letters A (soft) to Z (hard) refer to the hardness grade. Static hardness is defined according to the ISO or FEPA standard [21, 22]. Dynamic hardness, which builds on static hardness and is further influenced by the grinding speed, is critical for the process. Dynamic hardness increases with increasing grinding speed. Grinding wheels classified as static hardness F to K are typically used for grinding bevel gears [26-29].

The total volume of the grinding wheel is made up of the abrasive grain, the bonding material, and the pore volume. The volume of the pores characterises the structure and is of paramount importance for the grinding process. Porous pores form chip chambers and assist in cooling during grinding. Every grinding wheel has natural porosity. Fine texture is used when low surface roughness is required. The porous structure allows for a higher removal rate as it allows more material to be removed from the contact area, and the wheel can absorb more

coolant. Porous grinding wheels are usually used for rough grinding. The higher the number of structures, the more porous the grinding wheel will be. The natural porosity of a grinding wheel can be increased artificially by the addition of a special pore-generating agent, which produces additional pore space [26-29].

Manufacturers use different wheel classification systems to mark grinding wheels. In most cases, the following properties are specified: abrasive type, granulation, hardness, structure, binder, porosity, e.g.: Example: 64A60H15VP - 64A is a blend of monocrystalline and pink aluminium oxide, medium grain size 60, soft wheel grade H, wheel structure 15, vitrified bond type, induced porosity [28].

4. Market Analysis of Grinding Wheels for Spiral Gears

As part of the research on the selection of the grinding wheel, the recommendations of seven manufacturers of grinding wheels for spiral bevel gears were checked. Only producers with a generally available offer were included. The following paragraphs describe the grinding wheels offered by the individual manufacturers.

4.1. Weiler

WEILER offers three grinding wheels options, depending on the type of processing under analysis. The best solution, according to the company, is the V59 product, recommended for the best performance and cutting depth. It is constructed of high performance ceramics paired with superior V59 bond technology. According to the manufacturer's specifications, it can cut up to 80 metres per second, and occasionally higher for specific applications. The offer lacks detailed information on the grain and binder used for the production of grinding wheels. When choosing, you can only rely on the opinion provided by the manufacturer. The second solution proposed is the V35 grinding wheel with Engineered aluminium oxide abrasive paired with the V35 bond technology, while the cheapest proposition is the V57 Performance Premium aluminium oxide abrasive paired with the advanced V57 bond technology [26].

4.2. Winterthur

Winterthur is currently part of the 3M company, although the company's products are still available on the market. Before the merger, Winterthur offered customised grinding wheels for the respective application. For universal application for case-hardened steel, a wheel with

ceramic aluminium oxide (30%) Vitrified bond, 70 grit size (medium), medium wheel grade is recommended. For automotive case-hardened steel gears, the manufacturer offers ceramic aluminium oxide (30%) vitrified bond, 80 grit size (medium - fine), soft wheel grade. For gears with large contact areas and high load bearing, for example: forklifts, ceramic aluminium oxide (30%) vitrified bond, 120 grit size (medium), soft wheel grade wheels were proposed. For bevel gears used in aerospace materials (Inconel etc.), white aluminium oxide wheels with brown bond, vitrified bond, 80 or 120 grit size (medium or fine), very soft wheel grade have been developed. Due to the merger with the 3M company, the details of the technologies used in the mentioned grinding wheels will be described in the paragraph regarding this company [28].

4.3. Tyrolit, Butzbacher, Hermes

The indicated companies offer grinding wheels made of sintered aluminium oxide with vitrified bond dedicated to grinding bevel gears, but there is no detailed information on the materials used and the best machining parameters for this grinding wheel [30-32].

4.4. Norton

Have an offer in three tiers in grit and two tiers in bond. The solution recommended by the manufacturer is Norton Altos TGX, which is characterised by high-performance ceramics, extra sharp extruded grains, and a natural open structure. The advantages of this product are fast and deep cutting, longer wheel life, and cool cutting. The second proposal of the analysed company is Norton Quantum 3NQ with engineered microstructure ceramic grain, latest grain technology, engineered grain boundaries, which is recommended due to free cutting action, long life, and the possibility of use in low, medium, and high forces. The grinding wheel that closes the offer of the indicated company is SGB with mean ceramic concentration, dilution with strong abrasive and good cutting effect, and, moreover, this grinding wheel is characterised by a longer wheel life. As part of the indicated grains, the manufacturer is the first to recommend the VCF binder, which is a highly porous and permeable vitrified bond, has a natural open structure, and allows maximum coolant access to the grinding zone. The offer also includes the Vitrium VS 3 binder described as the latest generation high-performance vitrified bond, which forms holding and suitable for high speed operations. ALTOS technology provides grinding wheels made of extruded ceramic grains (TG and TGX). Saint-Gobain develops and manufactures extruded ceramic grains (sintered corundum) with different length-width ratios; TG = 4/1 and TGX = 8/1. The grain shape, which is elongated, leads to random orientation during the mixing process. The described approach results in open porosity and high permeability, which is achievable without the use of any pore inducers. The elongated grains (bars) have an optimal shape for creating highly porous structures, which is shown in Fig. 2 [27, 33-35].

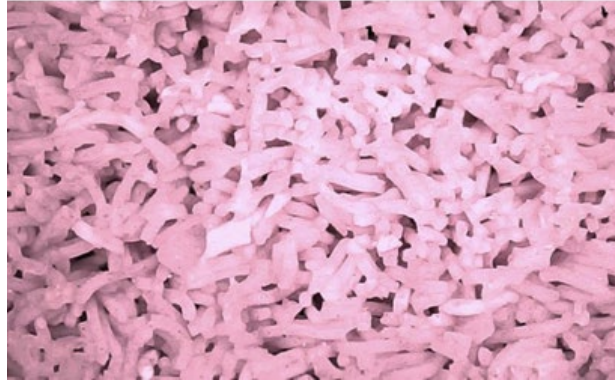


Fig. 2. Illustration of the highly porous structure of an ALTOS wheel with a random orientation of the cylindrical rods

Rys. 2. Struktura wysoko porowatej ściernicy technologii ALTOS o losowym ułożeniu ziaren

Source: Zhang W. Experimental and computational analysis of random cylinder packings with applications packings with applications. 2006 [36]

4.5. 3M

3M offers 3M Cubitron™ II Vitrified Grinding Wheels for solid grinding of precision-shaped grain and for finishing mix of white aluminium oxide and 3M precision-shaped grain all with vitrified bond.

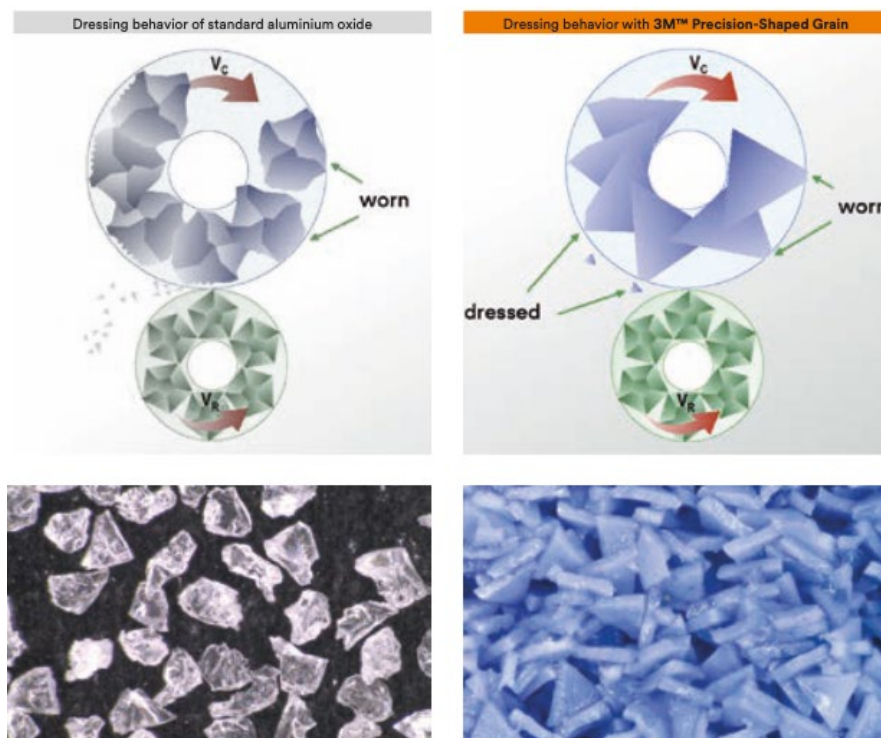


Fig. 3. Comparison of the shape and dressing behaviour of aluminium oxide and 3M precision-shaped grain

Rys. 3. Porównanie kształtu i zachowania podczas obciążania ziaren z tlenku glinu oraz ziaren 3M precision-shaped grain

Source: 3M™ Conventional Vitrified Grinding Wheels Technical Catalog 3M™ Precision Grinding & Finishing. 2020 [29]

The grains that make up Cubitron II are identical in size and are precisely formed triangles made of sintered corundum. The triangular grit is self-sharpening and cuts through the workpiece like a knife. The heat generated during the grinding process is dissipated directly through the chips, significantly reducing the risk of overheating. The advantage of the described solution is a very sharp grinding surface, which is characterised by an unprecedented material removal efficiency and lifetime. During the grinding process, the tips of the triangular grains break off to form new sharp edges. The result is a fast, cool grind and a longer mineral life. The described technology sets new standards, and the grain used by 3M is not marked in accordance with FEPA (e.g. P60), but with a "plus" sign (e.g. 60+). "Plus" means grinding like standard grinding wheels but with a much higher removal rate. Each individual abrasive grain is shaped identically to produce a precisely defined sanding pattern [29, 37, 38].

5. Conclusions

The presented overview of the abrasive products offered by the indicated companies is characterised by great diversity, also in terms of data availability. Most companies use sintered aluminium oxide with vitrified bonding for the production of standard solutions. There is also a noticeable variation in grain shape for the flagship products that are recommended as the most efficient. Grains range from the worms shape of ALTOS technology by Norton Saint-Gobain to the sharp and triangular structures of 3M's CUBITRON II technology. The available data on the grinding wheels used to grind spiral bevel gears show that manufacturers use different types of porosity, which translates into the efficiency of the grinding process, especially in the context of deep grinding. The increase in porosity significantly facilitates the access of the lubricant to the grinding zone and prevents burns.

In further research in this field, it would be necessary to compare the presented solutions in an experimental manner to determine the strengths of each of them. Conducting such research would indicate the direction of further development. Unfortunately, the catalogue information is insufficient and does not allow a proper comparison of the grinding wheels. Each manufacturer, focused on the quality, but also the profitability, of the offered products, describes them in a way that encourages the purchase and emphasises only the advantages. Comparison of grinding wheels using the experimental method requires ordering grinding wheels from individual manufacturers and checking them on the currently produced model of spiral bevel gear. Such an approach would be effective, but it generates the following costs:

- the cost of purchasing different types of grinding wheels,
- grinding machine labour cost,
- labour cost of machine operators,
- costs resulting from the time spent on testing,
- cost of blank materials used to test grinding wheels.

In addition to the listed costs, there are also indirect costs not directly related to the experiment, but affecting the financial results of the company interested in purchasing grinding wheels.

The analysis shows that the most promising products to be tested in the context of deep grinding are 3M's CUBITRON II technology wheels with a natural self-sharpening ability and NORTON Saint-Gobain's ALTOS technology wheels with a natural structure of high porosity. The parameters indicated are crucial in the context of deep grinding. The demand for greater efficiency in grinding processes is present in various branches of the machining industry and is likely to increase [39-41]. Furthermore, more and more attention is paid to the monitoring of grinding processes during these processes [15], hence the need to validate market solutions under laboratory conditions, which is planned in the context of the presented analysis.

References

1. Klingelnberg J. Bevel Gear. 2016.
2. Skawiński P., Kret M. Mathematical Model of the Modified Roll for Spiral Bevel Gears Milling Machines. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2013;37.
3. Stadtfeld H.J. E-Drive Transmission Guide – New Solutions for Electric and Hybrid Vehicle Transmissions. New York: The Gleason Works; 2020.
4. Duhre P., López J. Increasing Energy Efficiency through Improved Gear Surfaces in e-Mobility. *Gear Technology*. 2021; July:42–5.
5. Litvin F.L, Fuentes A. *Gear Geometry And Applied Theory*. 2004.
6. Skawinski P. Neural Classifiers in recognizing of the tooth contact of spiral and hypoid Gleason bevel gears. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2012;36.
7. Radzevich S.P. *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture*. Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture. 2021.
8. Stadtfeld H.J. Rules for Optimal Basic Design of Bevel Gears. *Gear Technology*. 2016; May:54–62.
9. Stadtfeld H.J. Bevel Gear Cutting Methods. *Gear Technology*. 2016; June:54–64.
10. Frint H. NASA Contractor Report 4083 Spiral Bevel Gears. 1987.
11. Maiuri T.J. Spiral Bevel and Hypoid Gear Cutting Technology Update. *Gear Technology*. 2007; July:28–39.
12. Müller H., Thomas J. Face-off, Face milling vs. Face Hobbing. *Gear Solutions*. 2007; September:49–60.
13. Rakhit A.K., ASM International. *Heat treatment of gears : a practical guide for engineers*. ASM International; 2000.
14. Stadtfeldt H.J. Hard-Finishing Spiral Bevel Gears. *Gear Technology*. 2016; March/April:54–5.

15. Bergs T., Löpenhaus C., Solf M. Potentials for Process Monitoring in Bevel Gear Grinding Manufacturing of Bevel Gears. *Gear Technology*. 2021; July:60–71.
16. Mazuru S., Scaticailov S., Stingaci I. Grinding of the gears with high depth processing. *MATEC Web of Conferences*. 2017;112:01019.
17. Tawakoli T. High Efficiency Deep Grinding. 1993.
18. Stephenson D., Corbett J. A critical study of High Efficiency Deep Grinding. 2001.
19. Cannella A. Gear Grinding Today. *Gear Technology*. 2017; June:22–7.
20. Cannella A. Cutting Down on Setup Time. *Gear Technology*. 2018; June:20–5.
21. FEPA. FEPA: FEPA-Standard 42-1. fepa-abrasives.org/; 2006.
22. ISO. ISO/TC 29/SC 5. 1983.
23. Stadtfeldt H.J. What to know about Bevel Gear Grinding. *Gear Technology*. 2005; September/October:46–9.
24. Nadolny K. State of the art in production, properties and applications of the microcrystalline sintered corundum abrasive grains. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer London; 2014;74:1445–57.
25. Nadolny K., Sienicki W., Wojtevicz M. The effect upon the grinding wheel active surface condition when impregnating with non-metallic elements during internal cylindrical grinding of titanium. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Elsevier; 2015;15:71–86.
26. Weiler. Weiler – Gear Grinding Solutions.
27. Norton Saint-Gobain. Technical solutions for grinding.
28. Wintherthur. Precision Grinding Wheels 2011 Catalogue Wintherthur. 2011.
29. 3M. 3M TM Conventional Vitriified Grinding Wheels Technical Catalog 3MTM Precision Grinding & Finishing. 2020.
30. Tyrolit. Tyrolit – Tools and system solutions.
31. Butzbacher. Butzbacher – Abrasive systems for optimal production processes.
32. Hermes. Hermes Cerfine BG Competitor.
33. Maerin M., Plainte P., Mundt E. Teaming Up to Solve Bevel Gear Grinding Application Challenges. *Gear Technology*. 2021; July:38–41.
34. Graham D., Plainte P. Advances in Abrasive Technology for Grinding Gears from Solid. *Gear Solutions*. 2013; December:46–55.
35. Highly porous bond systems | Norton Abrasives.
36. Zhang W. Experimental and computational analysis of random cylinder packings with applications packings with applications. 2006.
37. 3M. 3M Application Guide Gear Grinding. 2018.
38. Schalaster R. A new era? 3MTM CUBITRON™ II reveals full potential of bevel gear grinding. Klingelberg. 2014;
39. Jaster M. Spin City – Grinding Wheel Technology Focuses on Speed, Efficiency and Time Savings. *Gear Technology*. 2018;November/December:22–7.

40. Oliveira J.F.G., Silva E.J., Guo C., Hashimoto F. Industrial challenges in grinding. CIRP Ann Manuf Technol. 2009;58:663–80.
41. Kacalak W., Lipiński D., Szafraniec F. Kierunku rozwoju narzędzi i technologii obróbki oraz podstawy optymalizacji procesów obróbki ścierniej – Przemysł 4.0. 2018.

CHARAKTERYSTYKA ŚCIERNIW WYKORZYSTYWANYCH W SZLIFOWANIU STOŻKOWYCH KÓŁ ZĘBATYCH O KOŁOWO-ŁUKOWEJ LINII ZĘBA

Streszczenie

Mimo upływu wielu lat od ich wynalezienia, przekładnie stożkowe stanowią znaczący typ przekładni i zyskują na znaczeniu w kontekście elektrycznych i hybrydowych środków transportu. Przemysł motoryzacyjny i lotniczy to główne obszary, w których spotyka się przekładnie stożkowe. Jednym ze sposobów spełnienia rosnących wymagań eksploatacyjnych dla przekładni zębatych stożkowych jest optymalizacja wykończenia powierzchni kół zębatych i szlifowanie kół zębatych z litego materiału co skraca czas obróbki, przyczyniając się do bardziej wydajnej produkcji jednostkowej lub małoseryjnej. Oprócz zwiększenia przeniesionego momentu obrotowego, pozwala to również na poprawę wydajności.

Proces szlifowania kół zębatych stożkowych o kołowo-łukowej linii zęba pozwala spełnić najwyższe wymagania stawiane przez projektantów. Obecność na rynku różnych rozwiązań ściernic wymaga wdrożenia i weryfikacji możliwości współpracy z obrabianym materiałem i parametrami pracy. Porównując różne ziarna i różne rodzaje spoiwa, możliwe będzie wskazanie dalszych kierunków rozwoju i opracowanie procedury doboru najlepszych parametrów procesu szlifowania w celu uzyskania określonych właściwości użytkowych i funkcjonalnych przekładni.

W artykule zwrócono uwagę na materiały ściernie oferowane do szlifowania stożkowych kół zębatych o kołowo-łukowej linii zęba, które mogłyby znaleźć zastosowanie w technologii Deep Grinding bądź High Efficiency Deep Grinding. Artykuł stanowi przegląd aktualnych rozwiązań ściernic przeznaczonych do tego rodzaju obróbki i wprowadzenie do badań wpływu rodzaju ścierniwa i parametrów pracy na właściwości eksploatacyjne przekładni.

Słowa kluczowe: stożkowe koła zębate, szlifowanie, ścierniwa, szlifowanie głębokie, ściernice

CHARACTERISTICS OF THE ABRASIVES USED IN GRINDING OF SPIRAL BEVEL GEARS

Abstract

Despite the many years since their invention, bevel gears are a significant type of transmission and are gaining importance in the context of electric and hybrid means of transport. The automotive and aerospace industries are the main areas where bevel gears are encountered. One way to meet the increasing operational requirements for bevel gears is to optimise the surface finish of the gears and grind the gears from solid material, which reduces machining time and contributes to more efficient one-off or small-lot production. In addition to increasing the torque transmitted, this also allows for improved efficiency.

The spiral bevel gear grinding process allows us to meet the highest design specifications. The presence of various grinding wheel solutions on the market requires the implementation and verification of the possibility of cooperation with the processed material and the work parameters. By comparing different grains and different types of binders, it will be possible to indicate further development directions and develop a procedure to select the best parameters of the grinding process to obtain the specific performance and functional properties of the gear.

The article draws attention to the abrasive materials offered for grinding spiral bevel gears, which could be used in deep grinding or high-efficiency deep grinding technology. The article is a review of current solutions of grinding wheels intended for this type of machining and an introduction to the study of the impact of the type of abrasive and operating parameters on the operational properties of the transmission.

Keywords: spiral bevel gears, grinding, abrasives, deep grinding, grinding wheels

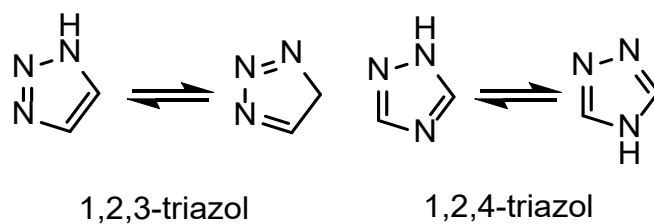
Marcin ŁUCZYŃSKI¹

SYNTEZA I ZASTOSOWANIE AKTYWNYCH BIOLOGICZNIE POCHODNYCH 1,2,4-TRIAZOLU

1. Budowa i właściwości pochodnych 1,2,4-triazolu

Triazole zaliczane są do grupy pięcioczłonowych układów heterocyklicznych, zbudowanych z trzech atomów azotu i dwóch atomów węgla. W zależności od rozlokowania atomów azotu wyróżnić można dwa izomery – 1,2,3-triazole bądź 1,2,4-triazole (rysunek 1) [1]. Cząsteczki te nie występują naturalnie w środowisku, a otrzymanie ich możliwe jest jedynie w warunkach laboratoryjnych [2]. Zarówno izomer 1,2,3-triazolu, jak i 1,2,4-triazol mają wszystkie atomy o hybrydyzacji sp^2 oraz 6π elektronów zdelokalizowanych, co świadczy o charakterze aromatycznym opisywanych związków [1]. Sama nazwa triazol została po raz pierwszy użyta w 1885 roku przez Bładina, który opisał ten układ pierścienia węglowo-azotowego. Jego praca była wynikiem odkrycia przez Fischera reakcji, jakiej ulegała cząsteczka cyjanu z fenylohydrazyną, dając tak zwaną dikarboanionofenylohydrazynę. Pierwotna nazwa oraz sam sposób numerowania układu pierścieniowego są zbliżone do używanych obecnie. W 1889 roku Andreocci zaproponował alternatywną nazwę – pirodiazol. Początkowo popierano stosowanie nazwy wywodzącej się od pirolu, lecz później zmieniono ją i od tego czasu nazwa triazol jest powszechnie używana. W literaturze znaleźć można także nazwy v-triazol oraz s-triazol. Nazwy te odnoszą się do dwóch izomerów, kolejno 1,2,3-triazolu i 1,2,4-triazolu. Odkrycie, że niektóre triazole wykazują silne właściwości chwastobójcze, przeciwpadaczkowe oraz zdolne są do hamowania tworzenia się mgieł w emulsjach fotograficznych, spowodowało, że zainteresowanie tą grupą związków znacząco wzrosło, szczególnie w przemyśle chemicznym [3].

¹ Marcin.Luczynski@polsl.pl, Katedra Technologii Chemicznej Organicznej i Petrochemii, Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/rch5/>

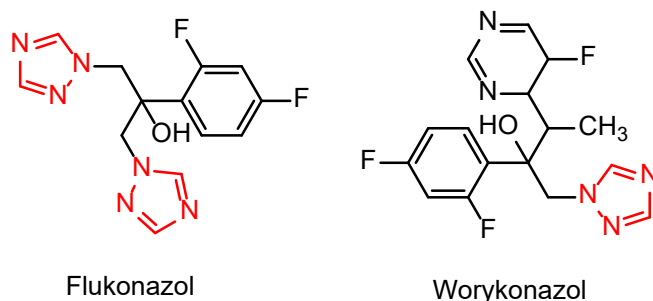


Rys. 1. Możliwe izomery triazolu

Fig. 1. Possible triazole isomers

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

Obecnie wiadomo, że wiele pochodnych 1,2,4-triazolu cieszy się dużym zainteresowaniem, szczególnie w medycynie i farmacji, ze względu na ich szerokie spektrum aktywności biologicznej. Tytułowe związki wykazują między innymi działanie przeciwgrzybicze [4], przeciwdrgawkowe [5], przeciwgruźlicze [6], przeciwbakteryjne [7], przeciwwirusowe [8], przeciwzapalne [9], przeciwbólowe [10], przeciwnowotworowe [11], przeciwdepresyjne [12], immunosupresyjne [13] czy hipotensyjne [14]. Warto zwrócić szczególną uwagę na pochodne 1,2,4-triazolu o działaniu przeciwgrzybiczym, które stanowią ważną klasę leków szeroko stosowanych w leczeniu różnego typu zakażeń grzybiczych. Mowa tu głównie o *Flukonazolu* i *Worykonazolu* (rysunek 2), które działając przez hamowanie 14 α -demetylasy cytochromu P450 (CYP51) – niezbędnego enzymu w szlaku biosyntezy sterolu, są skutecznymi lekami o szerokim spektrum działania przeciwko grzybom oraz mają niską toksyczność [15, 16].



Rys. 2. Cząsteczki Flukonazolu i Worykonazolu

Fig. 2. Fluconazole and Voriconazole molecules

Źródło: opracowanie własne na podstawie [17]

Pochodne 1,2,4-triazolu chętnie wykorzystywane są także w rolnictwie jako skuteczne środki chwastobójcze. Jednym z takich związków jest *Propikonazol*, który cechuje się szerokim spektrum działania przeciwgrzybiczego. Mechanizm działania omawianego związku opiera się na hamowaniu biosyntezy ergosterolu w organizmie grzybów [2].

Ze względu na posiadanie przez cząsteczkę 1,2,4-triazolu aż trzech atomów azotu w pierścieniu heterocyklicznym możliwe jest tworzenie wiązań koordynacyjnych i powstawanie związków zawierających zakleszczone w strukturze triazolu jony metali [18]. Fakt ten wykorzystywany jest głównie przy tworzeniu związków metaloorganicznych (MOF) lub materiałów magnetycznych [19, 20]. Możliwe jest również zastosowanie soli

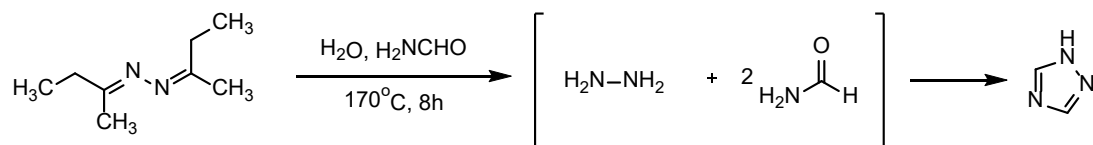
1,2,4-triazolowych jako prekursorów do tworzenia karbenów *N*-heterocyklicznych (NHC), które po raz pierwszy otrzymane zostały przez Arduengo w 1991 roku [21]. Obecnie karbeny te wykorzystywane są w reakcjach katalizowanych za pomocą związków metaloorganicznych oraz w organokatalizie. Za szczególnie istotne uważa się kompleksy NHC z metalami przejściowymi, głównie z palladem oraz rutenem, które stosowane są w reakcjach krzyżowego sprzężenia bądź metatezy olefin [22].

Niektóre sole 1,2,4-triazolowe występują w postaci cieczy jonowych, w związku z czym są one chętnie stosowane jako nowoczesne rozpuszczalniki w zielonej chemii [23]. Ze względu na dużą zawartość azotu w cząsteczce 1,2,4-triazole są również wykorzystywane w produkcji materiałów wybuchowych, pirotechnicznych oraz paliw [24, 25].

2. Podstawowe metody syntezy pochodnych 1,2,4-triazolu

Po raz pierwszy w historii synteza 1,2,4-triazolu opisana została przez Bladina w 1885 roku. Początkowe metody, takie jak reakcja formylohydrazyny z formamidem, przebiegały z niską wydajnością otrzymywania pochodnych triazolu [3]. Późniejsze próby prowadzenia kondensacji z udziałem siarczanu hydrazyny i formamidu poprawiły wydajność do około 53% [2]. Ainsworth i Jones zdołali otrzymać 1,2,4-triazol z wydajnością 80%, stosując hydrat hydrazyny i formamidu, uzyskując *N,N*-diformylohydrazynę, która poddana została następnie działaniu amoniaku, prowadząc reakcję w autoklawie w temperaturze 200°C przez 24 godziny [26]. Nowocześniejsza metoda syntezy 1,2,4-triazolu opracowana przez Petree, która zakładała przeprowadzenie bezpośredniej reakcji hydrazyny i formamidu, została opatentowana w 1981 roku. Zakładała ona wprowadzenie hydrazyny w postaci hydratu jako delikatnego strumienia do podgrzanego wcześniej do temperatury 170°C formamidu. Dodatkowo mieszanina amoniaku i kwasu mrówkowego, która generowana jest podczas procesu, ulega ciągłemu oddestylowaniu. Po przeprowadzeniu oczyszczania za pomocą destylacji i rekrytalizacji otrzymywano 1,2,4-triazol o czystości 96-98% z wydajnością w przedziale 84-90%. Zastosowanie tej procedury umożliwiło osiągnięcie poprawy wydajności produktu przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej czystości i zastosowaniu niskiego stosunku formamidu do hydrazyny, który mógł wynosić nawet 1:4. Dodatkowo użycie tej metody skutkowało zmniejszeniem wydzielania się produktów ubocznych, takich jak 4-amino-1,2,4-triazolu [27]. W 1999 roku opracowana została inna, podobna metoda otrzymywania pochodnych 1,2,4-triazolu, zaproponowana przez Nagata i wsp. W metodzie tej jako substratów wyjściowych użyto ketazyn zamiast samej hydrazyny. Zastosowanie zwłaszcza acetozynianu bądź metyloetyloketazyny jest korzystne, ponieważ związki te otrzymywane są ubocznie przy produkcji przemysłowej hydrazyny. W pierwszym etapie tej metody następuje otrzymanie

hydrazyny w wyniku przeprowadzenia hydrolizy ketazyny, która reaguje następnie z formamidem i otrzymuje się 1,2,4-triazol (rysunek 3) [28].

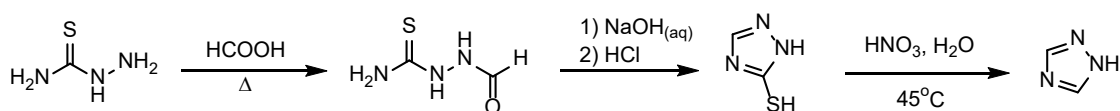


Rys. 3. Reakcja otrzymywania 1,2,4-triazolu

Fig. 3. Reaction to obtain 1,2,4-triazole

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2]

Inną możliwość otrzymywania 1,2,4-triazolu zaproponował Ainsworth, wychodząc z 1-formylo-3-tiokarbazydu, uzyskanego z kwasu mrówkowego i tiosemikarbazydu, który zostaje poddany reakcji cyklizacji w warunkach zasadowych do 1,2,4-triazol-3-tiolu i następnie utlenieniu do 1,2,4-triazolu z wykorzystaniem stężonego kwasu azotowego(V) (rysunek 4) [29]. Z kolei Henry oraz Finnigan zapronowali otrzymanie triazolu, przeprowadzając deaminację heterocyklicznych amin przez diazotowanie w obecności kwasu fosfinowego [30]. Metoda ta może być również wykorzystana do 3-amino-1,2,4-triazolu, który ulega szybkiemu diazotowaniu i redukcji do 1,2,4-triazolu. Prowadzenie deaminacji 1-amino-1,2,4-triazolu bądź też 4-amino-1,2,4-triazolu można także osiągnąć przez zastosowanie tetrafluoroboranu nitrozyłu z uwolnieniem azotu i tlenku azotu. Wydajność otrzymywania 1,2,4-triazolu za pomocą tej metody może wynosić nawet 77% [31].



Rys. 4. Reakcja otrzymywania 1,2,4-triazoli z tiokarbazydu

Fig. 4. Reaction for obtaining 1,2,4-triazoles from thiocarbazide

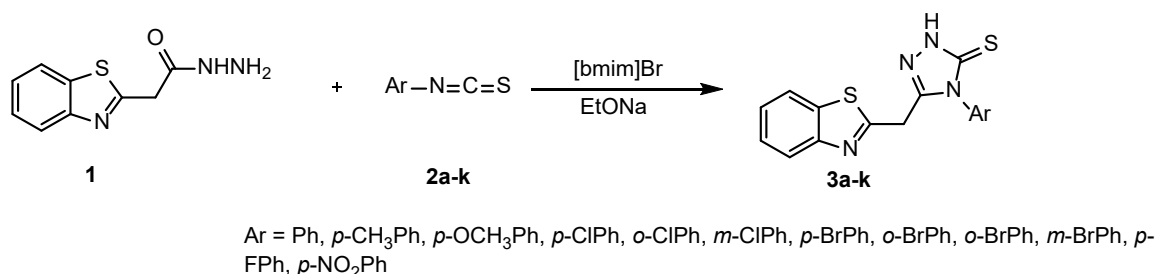
Źródło: opracowanie własne na podstawie [2]

3. Syntezy pochodnych 1,2,4-triazolu wykazujących aktywność biologiczną

Przedstawione w pracy różne metody otrzymywania wybranych cząsteczek zawierających ugrupowanie 1,2,4-triazolu, które wykazują aktywność biologiczną, opierają się na przeprowadzeniu kilkietapowej sekwencji przemian, wychodząc z handlowo dostępnych reagentów. Struktury otrzymanych produktów zostały potwierdzone z zastosowaniem typowych metod spektroskopowych oraz wykonane zostały badania poświęcone aktywności biologicznej.

3.1. Jednoetapowa synteza pochodnych 1,2,4-triazol-3-tionu wykazujących działanie przeciwgrzybicze z wykorzystaniem cieczy jonowych

Synteza zaproponowana przez Hassan i wsp. opiera się na przeprowadzeniu bezpośredniej, jednoetapowej kondensacji 2-(benzotiazolo-2-ilo)acetohydrazynu (**1**) z izotiocyjanianami aryłu (**2a-k**) prowadzonej z użyciem etanolanu sodu i cieczy jonowej w postaci bromku 1-butyl-3-metyloimidazoliowego ([bmim]Br). Mieszaninę reakcyjną mieszano przez około 3 godziny w temperaturze pokojowej. Postęp reakcji śledzono, wykorzystując do tego celu chromatografię cienkowarstwową TLC przy użyciu octanu etylu:heksanu w stosunku objętościowym 3:7 jako fazy ruchomej. Otrzymano w ten sposób pochodne 1,2,4-triazol-3-tionu z wydajnościami sięgającymi 80-95% (rysunek 5). Struktury otrzymanych produktów potwierdzono za pomocą spektroskopii w podczerwieni (IR), spektroskopii magnetycznego rezonansu jądrowego (^1H i ^{13}C NMR), spektroskopii mas (MS) oraz analizy elementarnej [32].



Rys. 5. Reakcja otrzymywania pochodnych 1,2,4-triazol-3-tionu

Fig. 5. Reaction for obtaining 1,2,4-triazol-3-thione derivatives

Źródło: opracowanie własne na podstawie [32]

Otrzymane pochodne 1,2,4-triazolu zostały przebadane pod kątem działania przeciwgrzybiczego wobec *Aspergillus fumigatus* i *Candida albicans* z zastosowaniem metody seryjnej rozcieńczalności płytek. W tym celu dokonano optymalizacji potencjału przeciwgrzybiczego pochodnych zawierających podstawniki o różnych właściwościach elektronoakceptorowych i elektronodonorowych na pierścieniu aromatyczny. Podstawowa pochodna niezawierająca żadnych podstawników (**3a**) wykazywała jedynie minimalną aktywność biologiczną o wartości MIC 50 $\mu\text{g/ml}$ wobec obu szczepów grzybów. Związki zawierające podstawniki elektronodonorowe (grupa metylowa i metoksyłowa) (**3b**, **3c**) charakteryzowały się jeszcze większym zmniejszeniem aktywności przeciwgrzybiczej. Zastosowanie fluorowca jako podstawnika elektronodonorowego, w szczególności w położeniu *para* (**3d**), spowodowało radykalne zwiększenie działania przeciwgrzybiczego (MIC 12,5 $\mu\text{g/ml}$ wobec *A. fumigatus* i MIC 0,39 $\mu\text{g/ml}$ wobec *C. albicans*). Zastosowanie tego samego podstawnika w innych pozycjach pierścienia fenyłowego (**3e**, **3f**) powodowało pogorszenie aktywności biologicznej (MIC >200 $\mu\text{g/ml}$). Podobna sytuacja pojawiała się w przypadku użycia innego atomu halogenowca jak pochodne (**3g**, **3h**, **3i**). Przeprowadzone wyniki badań jednoznacznie udowodniły, że w przypadku wykorzystania omawianej grupy związków zawierających ugrupowanie 1,2,4-triazolowe i zawierające atom halogenowca w pozycji *para*

powodowało uzyskanie dużo lepszej aktywności przeciwgrzybiczej niż z zastosowaniem do tego celu pochodnych zawierających atom halogenu w pozycjach *orto* bądź *meta*. Autorzy publikacji wskazują, że przyczyną może być występowanie zawady sterycznej w przypadku położenia *orto*. Pozostałe związki zawierające atom fluoru oraz grupę nitrową wykazywały umiarkowaną aktywność przeciwgrzybiczą. Uzyskane wartości porównano z próbką zawierającą *Flukonazol* jako szeroko stosowany lek przeciwgrzybiczy, który wykazał siłę hamowania wzrostu grzybów na poziomie MIC 50,00 oraz 0,78 µg/ml odpowiednio dla *A. fumigatus* i *C. albicans* (tabela 1) [32].

Tabela 1

Charakterystyka otrzymanych pochodnych 1,2,4-triazol-3-tionu

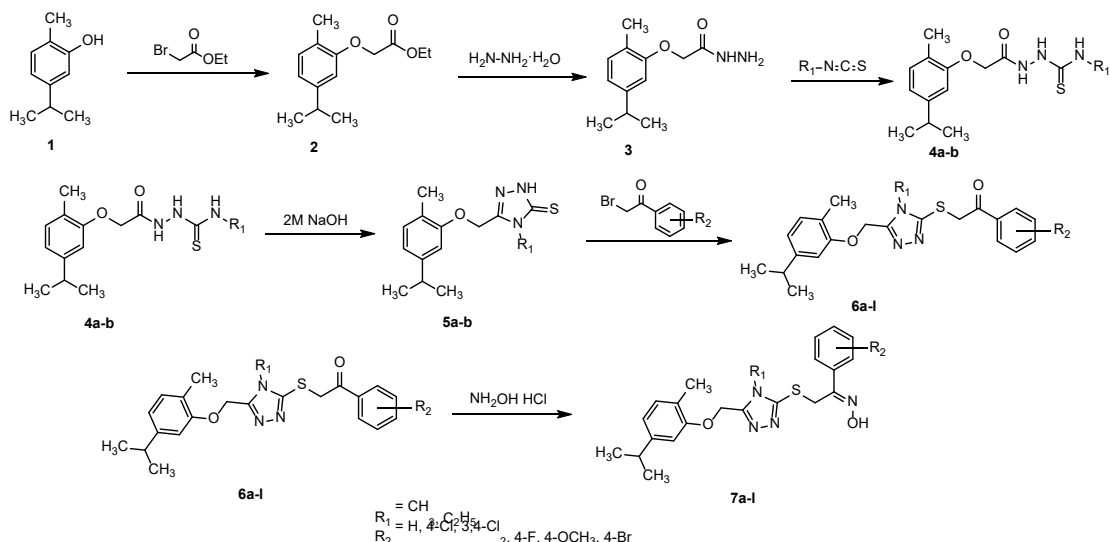
Związek	Ar	t.topn. [°C]	MIC [µg/ml]	
			<i>A. fumigatus</i>	<i>C. albicans</i>
3a	Ph	116-118	50	50
3b	<i>p</i> -CH ₃ Ph	212-214	>200	>200
3c	<i>p</i> -OCH ₃ Ph	150-152	>200	>200
3d	<i>p</i> -ClPh	136-138	12,5	0,39
3e	<i>o</i> -ClPh	190-192	>200	>200
3f	<i>m</i> -ClPh	202-204	>200	>200
3g	<i>p</i> -BrPh	206-208	25	1,56
3h	<i>o</i> -BrPh	180-182	>200	>200
3i	<i>m</i> -BrPh	176-178	200	200
3j	<i>p</i> -FPh	144-146	25	25
3k	<i>p</i> -NO ₂ Ph	168-170	25	25
Flukonazol	-		>50	0,78

Źródło: opracowanie własne na podstawie [32]

3.2. Synteza pochodnych 3-aryloksymetylo-1,2,4-triazolu wykazujących działanie przeciwzapalne i przeciwnowotworowe

Erensoy i wsp. zaproponowali sześćoetapową syntezę, wychodząc z handlowo dostępnego karwakrolu (**1**). W pierwszym etapie otrzymano ester w postaci 2-(5-izopropyl-2-metylofenoksy)octanu etylu (**2**) w wyniku przeprowadzenia reakcji pomiędzy karwakrolem a bromooctanem etylu. Reakcję prowadzono przez około 12 godzin, ogrzewając początkowo

mieszaninę do temperatury wrzenia przez 4 godziny. Jako zasady użyto bezwodnego węgla potasu zawieszono w bezwodnym acetonie. W kolejnym etapie rozpuszczalnik odparowano, a pozostałość ekstrahowano eterem dietylowym. Struktura otrzymanego produktu z wydajnością 80% została potwierdzona za pomocą wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC), spektroskopii w podczerwieni (IR) oraz ^1H NMR. W kolejnym etapie syntezy przeprowadzono reakcję otrzymywania hydrazynu (**3**), wykorzystując w tym celu otrzymany ester (**2**), który poddano reakcji z wodzianem hydrazyny rozpuszczonym w etanolu. Mieszaninę reakcyjną ogrzewano przez około 2 godziny do temperatury wrzenia, po czym roztwór został ochłodzony, a produkt wydzielony z wydajnością 73% i oczyszczony za pomocą rekrytalizacji z mieszaniny etanol:woda. Trzeci etap syntezy pomiędzy otrzymanym hydrazynem (**3**) i izotiocyjanianem metylu lub etylu przeprowadzono z wykorzystaniem etanolu jako rozpuszczalnika, doprowadzając mieszaninę reakcyjną do temperatury wrzenia, którą utrzymywano przez około 4 godziny. Utworzony produkt w postaci *N*-alkilo-2-[2-metylo-5-(propan-2-ylo)fenoksy]acetylo]hydrazynokarbotioamidu (**4a-b**) oczyszczono za pomocą rekrytalizacji z etanolu. Kluczowy etap syntezy, jakim jest cyklizacja uzyskanego wcześniej karbotioamidu do cząsteczki 1,2,4-triazolu, przeprowadzono w środowisku zasadowym, wykorzystując w tym celu 2M wodny roztwór NaOH. Mieszaninę reakcyjną ogrzewano do temperatury wrzenia przez około 4 godziny. Po następczej neutralizacji za pomocą 10-procentowego roztworu HCl produkt przesączono i oczyszczono za pomocą rekrytalizacji z etanolu. Struktury uzyskanych produktów w postaci 4-alkilo-5-{{2-metylo-5-(propan-2-ylo)fenoksy]metylo}2,4-dihydro-3*H*-1,2,4-triazol-3-tionu (**5a-b**) potwierdzono, wykorzystując w tym celu HPLC, IR, ^1H NMR oraz analizę elementarną. Zbadano także temperaturę topnienia oczyszczonych produktów. Ostatnie dwa etapy syntezy, obejmujące rozbudowanie układu zawierającego ugrupowanie 1,2,4-triazolu o pochodne 2-bromoacetofenonu, polegały na przeprowadzeniu reakcji pomiędzy pochodną 1,2,4-triazolu (**5a-b**) a bromkiem fenacylu z zastosowaniem jako zasady trietyloaminy (TEA). Reakcję prowadzono w acetonitrylu, ogrzewając mieszaninę reakcyjną do temperatury wrzenia przez 4-8 godzin. Rozpuszczalnik odparowano, a otrzymaną pozostałość oczyszczono za pomocą rekrytalizacji z mieszaniny woda:etanol. Struktury uzyskanych produktów (**6a-l**) potwierdzono, wykorzystując HPLC, IR, ^1H i ^{13}C NMR, MS i analizę elementarną. Ostatni etap syntezy polegały na przeprowadzeniu reakcji pomiędzy utworzonymi wcześniej pochodnymi ketonów (**7a-x**) i chlorowodoru hydroksyloaminy, którą prowadzono w etanolu i ze śladową ilością pirydyny. Mieszaninę reakcyjną ogrzewano do temperatury wrzenia przez 8-24 godzin. Po ochłodzeniu wytrącony produkt główny (**7a-l**) odsączono, wysuszono i oczyszczono za pomocą rekrytalizacji z etanolu (rysunek 6). Struktury uzyskanych produktów potwierdzono za pomocą HPLC, IR, ^1H i ^{13}C NMR, MS oraz analizy elementarnej [33].



Rys. 6. Synteza pochodnych 3-aryloxymetylo-5-[(2-okso-2-aryloetylo)sulfanylo]-1,2,4-triazolu
 Fig. 6. Synthesis of 3-aryloxymethyl-5-[(2-oxo-2-arylethyl)sulfanyl]-1,2,4-triazole derivatives
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [33]

Związki **5a-b** oraz **6a-l** i **7a-l** zostały przebadane przesiewowo pod kątem aktywności hamującej wobec mikrosomalnej syntazy-1 prostaglandyny E (mPGES-1). Jako związek odniesienia zastosowano 5-{[3-chloro-4-(4-cykloheksylobutoksy)fenylo]metylideno}-1,3-diazynano-2,4,6-trion (**8**), który jest silnym inhibitorem mPGES-1. W trakcie badania przesiewowego związku, które powodowały hamowanie aktywności enzymu powyżej 70%, były w dalszym etapie poddawane badaniu w stężeniu 10 μM . Wartości IC_{50} określone zostały jedynie dla tych związków, które wykazały aktywność hamowania na poziomie $\geq 70\%$ przy stężeniu 10 μM . Spośród wszystkich przebadanych cząsteczek najsilniejszą aktywność zaobserwowano dla pochodnej **7b** o stężeniu hamującym 0,224 μM . Z kolei związki **5a-b** nie wykazały żadnej aktywności wobec enzymu mPGES-1. Wstępne badania przesiewowe potwierdziły, że grupa etylowa w pozycji R_1 wpływa niekorzystnie na siłę hamującego działania enzymu mPGES-1. Może to być spowodowane faktem, że ugrupowania większe od grupy metylowej nie są tolerowane w miejscu wiązania. Autorzy zaobserwowali także, że aktywność biologiczna zostaje zwiększona w przypadku przekształcenia pochodnych ketonowych 1,2,4-triazolu (**6a-l**) w oksymy (**7a-l**) z wyjątkiem związku **6d**, który zawiera atom fluoru przy podstawniku R_2 . Związki, które wykazywały obiecującą aktywność biologiczną wobec enzymu mPGES-1, zostały przebadane pod kątem hamowania cyklooksygenazy COX-1 i COX-2. Wszystkie przebadane związki wykazały obiecującą aktywność, wynoszącą od 52% do 67% dla COX-1 oraz 84-86% dla COX-2 przy stężeniu 100 μM (Tabela 2) [33].

Charakterystyka otrzymanych pochodnych 3-aryloksymetylo-1,2,4-triazolu

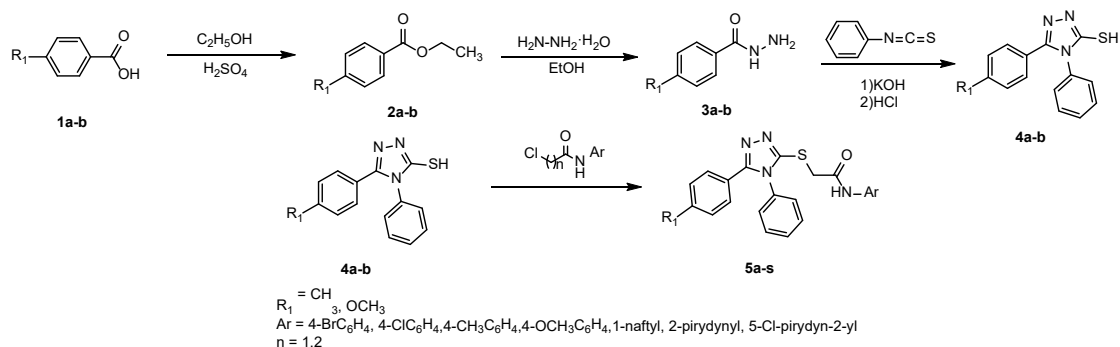
Związek	R ₁	R ₂	Aktywność przeciwko mPGES-1 (10 μM) [%]	mPGES-1 IC ₅₀ [μM]	Aktywność hamowania COX-1 i COX-2 [%]	
					COX-1	COX-2
5a	CH ₃	-	0	-	-	-
5b	C ₂ H ₅	-	21,0 ± 9,5	-	-	-
6a	CH ₃	H	22,0 ± 0,1	-	-	-
6b	CH ₃	4-Cl	16,0 ± 8,4	-	-	-
6c	CH ₃	3,4-Cl ₂	73,0 ± 8,6	3,83	62,94	85,77
6d	CH ₃	4-F	69 ± 12	3,051	63,12	85,20
6e	CH ₃	4-OCH ₃	84,0 ± 8,5	1,46	57,09	86,27
6f	CH ₃	4-Br	0	-	-	-
6g	C ₂ H ₅	H	2,0 ± 6,5	-	-	-
6h	C ₂ H ₅	4-Cl	0	-	-	-
6i	C ₂ H ₅	3,4-Cl ₂	30,0 ± 2,7	-	-	-
6j	C ₂ H ₅	4-F	14 ± 13	-	-	-
6k	C ₂ H ₅	4-OCH ₃	22 ± 9	-	-	-
6l	C ₂ H ₅	4-Br	53,0 ± 9,1	-	-	-
7a	CH ₃	H	55 ± 20	-	-	-
7b	CH ₃	4-Cl	83,0 ± 3,5	0,224	67,73	85,96
7c	CH ₃	3,4-Cl ₂	97,0 ± 7,1	1,54	66,67	84,39
7d	CH ₃	4-F	0	-	-	-
7e	CH ₃	4-OCH ₃	88 ± 17	2,44	66,31	84,76
7f	CH ₃	4-Br	85,0 ± 9,4	1,08	52,13	85,89
7g	C ₂ H ₅	H	6,5 ± 8,6	-	-	-
7h	C ₂ H ₅	4-Cl	50 ± 30	-	-	-
7i	C ₂ H ₅	3,4-Cl ₂	35,0 ± 3,3	-	-	-
7j	C ₂ H ₅	4-F	32 ± 13	-	-	-
7k	C ₂ H ₅	4-OCH ₃	0	-	-	-
7l	C ₂ H ₅	4-Br	22 ± 14	-	-	-
8			0,034 ± 0,014	-	-	-

Źródło: opracowanie własne na podstawie [33]

3.3. Synteza pochodnych 1,2,4-triazolo-*N*-aryloamidu wykazujących działanie przeciwnowotworowe

Turky i wsp. przedstawili metodę syntezy pochodnych 1,2,4-triazolo-*N*-aryloamidu, które wykazują się hamującym działaniem na białko przekaźnika sygnału i aktywatora transkrypcji (STAT3). Jest to rodzina cytoplazmatycznych czynników transkrypcyjnych, które mogą wiązać się z DNA oraz powodować transkrypcję określonych genów. Odgrywają one ważną rolę w wielu szlakach komórkowych, przez co mogą ulegać rozregulowaniu i nadmiernej ekspresji, powodując wystąpienie nowotworu. W organizmie ssaków występuje aż siedem rodzajów tego białka. Są to: STAT1, STAT2, STAT3, STAT4, STAT5a, STAT5b i STAT6. Białko STAT3 odgrywa rolę wielofunkcyjną i jest odpowiedzialne między innymi za różnicowanie, postęp komórkowy, odporność, hematopoezę, a nawet za przeżycie nowotworu. Białko to może zostać aktywowane przez cytokiny oraz czynniki wzrostu. Po aktywacji STAT3 jest fosforylowany za pomocą określonych kinaz, dimeryzuje i zaczyna regulować ekspresję genów.

Synteza pochodnych 1,2,4-triazolo-*N*-aryloamidu opierała się na przeprowadzeniu czteroetapowej sekwencji przemian, wychodząc z pochodnych kwasu benzoowego mających podstawniki w pozycji *para* (**1a-b**). W pierwszym etapie syntezy przeprowadzono reakcję estryfikacji w absolutnym etanolu i stosując stężony kwas siarkowy(VI) jako katalizator. Mieszaninę reakcyjną ogrzewano z zachowaniem mieszania do temperatury wrzenia. Wydajności otrzymywania estrów wyniosły 70-77%. Drugi etap opierał się na przeprowadzeniu substytucji uzyskanego wcześniej estru (**2a-b**) z wodzianem hydrazyny. Reakcję prowadzono z zastosowaniem etanolu jako rozpuszczalnika. Mieszaninę reakcyjną ogrzewano do temperatury wrzenia przez 6 godzin. Otrzymany produkt (**3a-b**) z wydajnością 90% wysuszono bez dalszego oczyszczania. Do przeprowadzenia reakcji cyklizacji otrzymanych hydrazydów (**3a-b**) użyto w pierwszym etapie izotiocyjanianu fenylu i etanolu, które ogrzewano do temperatury wrzenia przez 4 godziny. Po odparowaniu rozpuszczalnika sporządzono 2M roztwór KOH i dodano do pozostałości, ogrzewając dalej do temperatury wrzenia przez 3 godziny. Po ochłodzeniu dodawano stężony HCl do momentu uzyskania pH = 2. Utworzone w ten sposób produkty (**4a-b**) z wydajnościami 75-78% przesączono i wysuszono na powietrzu. W ostatnim etapie syntezy uzyskane pochodne 5-(arylo)-4-fenyl-4*H*-1,2,4-triazolo-3-tiolu (**4a-b**) zawieszono w roztworze TEA i dimfetyloformamidu (DMF), po czym dodano właściwą pochodną 2-chloro-*N*-aryloacetamidu lub 3-chloro-*N*-arylopropanamidu. Mieszaninę reakcyjną ogrzewano do temperatury 90°C przez około 8 godzin z ciągłym mieszaniem. Reakcję monitorowano za pomocą chromatografii TLC. Otrzymane produkty końcowe (**5a-s**) z wydajnościami 70-85% oczyszczono za pomocą chromatografii kolumnowej z użyciem mieszaniny heksan-octan etylu jako fazy ruchomej (rysunek 7). Struktury otrzymanych półproduktów i produktów końcowych potwierdzono za pomocą spektroskopii IR, MS, ¹H i ¹³C NMR [34].



Rys. 7. Synteza pochodnych 1,2,4-triazolo-N-aryloamidu
 Fig. 7. Synthesis of 1,2,4-triazole-N-arylamide derivatives
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [34]

Twórcy postanowili przeprowadzić badania cytotoksyczności *in vitro* otrzymanych związków przeciwko lekoopornej ludzkiej komórce gruczołaka piersi (MDA-MB-231). Badania zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu jako związku odniesienia *Doksorubicyny* – referencyjnego leku przeciwnowotworowego. Otrzymane wyniki potwierdziły umiarkowaną do dobrej aktywności cytotoksycznej dla siedmiu pochodnych, których zakres IC_{50} wynosił 3,61-17,05 μM . Związki **5a**, **5b**, **5j** i **5k** wykazały równie silną aktywność co standardowy lek przeciwnowotworowy. Co więcej, cząsteczki **5a** i **5j** cechowały się nawet silniejszym efektem cytotoksycznym niż *Doksorubicyna*. Ich wartości IC_{50} wyniosły odpowiednio 3,61 i 3,93 μM . Konieczność zastosowania większych dawek (do 87,02 μM) pochodnych **5f**, **5m**, **5o**, potrzebnych do zahamowania proliferacji komórek w 50%, wskazuje na łagodniejszą aktywność tych pochodnych (tabela 3) [34].

Tabela 3

Charakterystyka otrzymanych pochodnych 1,2,4-triazolo-N-aryloamidu

Związek	R_1	Ar	n	IC_{50} [μM]
5a	CH_3	4- BrC_6H_4	1	$3,61 \pm 0,56$
5b	CH_3	4- ClC_6H_4	1	$6,44 \pm 1,36$
5c	CH_3	4- $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4$	1	>100
5d	CH_3	4- $\text{OCH}_3\text{C}_6\text{H}_4$	1	$10,96 \pm 0,65$
5e	CH_3	1-naftyl	1	>100
5f	CH_3	2-pirydynyl	1	$77,60 \pm 0,96$
5g	CH_3	5-Cl-pirydyn-2-yl	1	$16,21 \pm 1,41$
5h	CH_3	4- BrC_6H_4	2	>100
5i	CH_3	4- $\text{OCH}_3\text{C}_6\text{H}_4$	2	>100
5j	OCH_3	4- BrC_6H_4	1	$3,93 \pm 0,27$
5k	OCH_3	4- ClC_6H_4	1	$4,55 \pm 0,55$
5l	OCH_3	4- $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4$	1	>100
5m	OCH_3	4- $\text{OCH}_3\text{C}_6\text{H}_4$	1	$87,02 \pm 1,17$

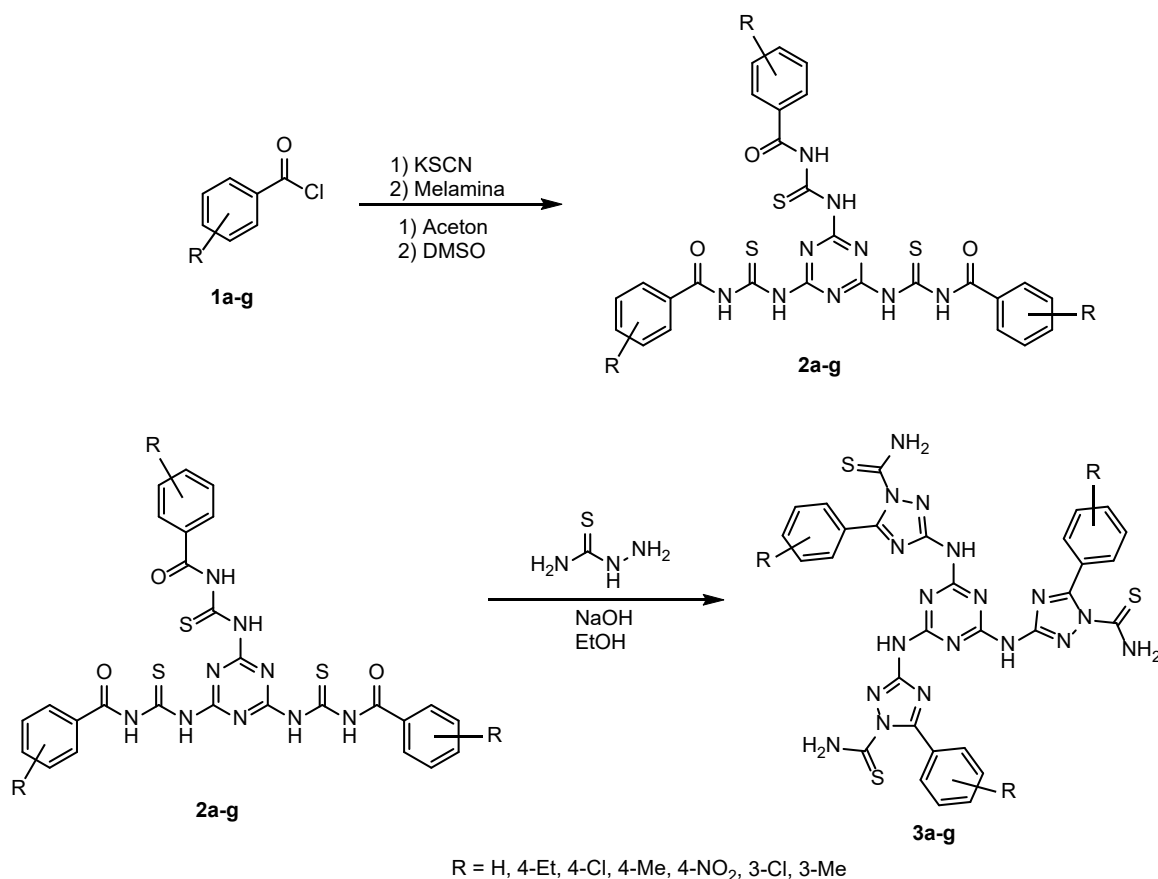
cd. tabeli 3

Związek	R ₁	Ar	n	IC ₅₀ [μM]
5n	OCH ₃	1-nfatyl	1	>100
5o	OCH ₃	2-pirydynyl	1	47,91 ± 0,72
5p	OCH ₃	5-Cl-pirydyn-2-yl	1	17,05 ± 1,01
5r	OCH ₃	4-BrC ₆ H ₄	2	>100
5s	OCH ₃	4-OCH ₃ C ₆ H ₄	2	>100
Doksorubicyna				4,50 ± 0,26

Źródło: opracowanie własne na podstawie [34]

3.4. Synteza pochodnych tris-1,2,4-triazolu wykazujących aktywność przeciwbakteryjną

Ghorbani i wsp. opracowali metodę syntezy pochodnych tris-1,2,4-triazolu, które wykazują potencjalne działanie przeciwbakteryjne. Synteza opiera się na przygotowaniu w pierwszym etapie pochodnych tris-tiomoczników (**2a-g**) przy wykorzystaniu do tego celu metody one-pot, czyli otrzymania produktu końcowego bez konieczności wydzielenia tworzących się w czasie reakcji półproduktów. Syntezę rozpoczęto, wychodząc z handlowo dostępnych pochodnych chlorku benzoilu (**1a-g**) zawierających podstawniki w pierścieniu aromatycznym, które rozpuszczono w bezwodnym acetonie i wkroplono do roztworu tiocyjanianu potasu w acetonie. Mieszaninę reakcyjną ogrzewano do temperatury wrzenia z zachowaniem mieszania przez około 1 godzinę. Po ochłodzeniu i przesączeniu mieszaniny przesącz odparowano do sucha, uzyskując utworzone pośrednio pochodne izotiocyjanianu benzoilu, do którego bezpośrednio dodano roztwór melaminy rozpuszczony w dimetylosulfotlenku (DMSO). Mieszaninę reakcyjną ponownie ogrzewano do temperatury wrzenia przez około 16 godzin, kontrolując postęp reakcji za pomocą chromatografii TLC, stosując układ rozwijający w postaci mieszaniny chloroform:metanol w stosunku objętościowym 4:1. Po ostudzeniu rozpuszczalnik odparowano do sucha, uzyskując produkt końcowy (**2a-g**) w postaci białych kryształów, które przemyto etanolem i wysuszono na powietrzu. W kolejnym etapie syntezy wydzielony tris-tiomocznik (**2a-g**) rozpuszczono w bezwodnym etanolu i dodano tiosemikarbazyd oraz katalityczne ilości NaOH. Mieszaninę reakcyjną ogrzewano do temperatury wrzenia przez około 3 godziny. Postęp reakcji cyklizacji do 1,2,4-triazolu śledzono za pomocą chromatografii TLC, stosując jako układ rozwijający mieszaninę chloroform:metanol 4:1. Po ochłodzeniu mieszaniny rozpuszczalnik odparowano do sucha, uzyskując produkty końcowe (**3a-g**) z wydajnościami 76-89%. Produkty oczyszczono za pomocą rekrytalizacji z mieszaniny woda:etanol (rysunek 8). Struktury otrzymanych produktów końcowych potwierdzono z zastosowaniem spektroskopii IR, ¹H i ¹³C NMR oraz analizy elementarnej. Zmierzono także temperatury topnienia [35].



Rys. 8. Reakcja otrzymywania pochodnych tris-1,2,4-triazolu

Fig. 8. Reaction to obtain tris-1,2,4-triazole derivatives

Źródło: opracowanie własne na podstawie [35]

Pochodne tris-1,2,4-triazolu przebadano pod kątem ich aktywności przeciwbakteryjnej. W tym celu zastosowano metodę dyfuzji krążkowej, która jest zgodna z procedurą Instytutu Norm Laboratoryjnych (CLSI 2017). Działanie przeciwbakteryjne zostało sprawdzone przeciwko standardowym szczepom bakteryjnym *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923), *Bacillus cereus* (ATCC 14579), *Escherichia coli* (ATCC 25922) i *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 15442). Każdy szczep dodano do sterylnego buforu fosforanowego, a otrzymaną zawiesinę naniesiono na podłoże agarowe i umieszczono badane związki. Jako substancję odniesienia zastosowano kilka podstawowych antybiotyków, które są obecnie powszechnie używane w leczeniu różnych zakażeń bakteryjnych. Wykorzystano między innymi *Penicylinę*, *Azytromycynę*, *Gentamycynę* oraz *Tetracyklinę*. Wszystkie otrzymane związki wykazały pożądaną aktywność przeciwko bakterii *E. coli*, *S. aureus*, *B. cereus*. Przeciwko bakteriom *P. aeruginosa* działanie wykazały jedynie dwa związki: **3a** i **3c**. Najsilniejsze działanie przeciwbakteryjne dla *E. coli* wykazał związek **3c**. Do najbardziej aktywnych pochodnych przeciwko *S. aureus* zaliczono związki **3e**, **3c** i **3f**, natomiast przeciwko *B. cereus* najwyższą aktywność wykazały pochodne **3c**, **3e** i **3b** (tabela 4) [35].

Charakterystyka otrzymanych pochodnych tris-1,2,4-triazolu

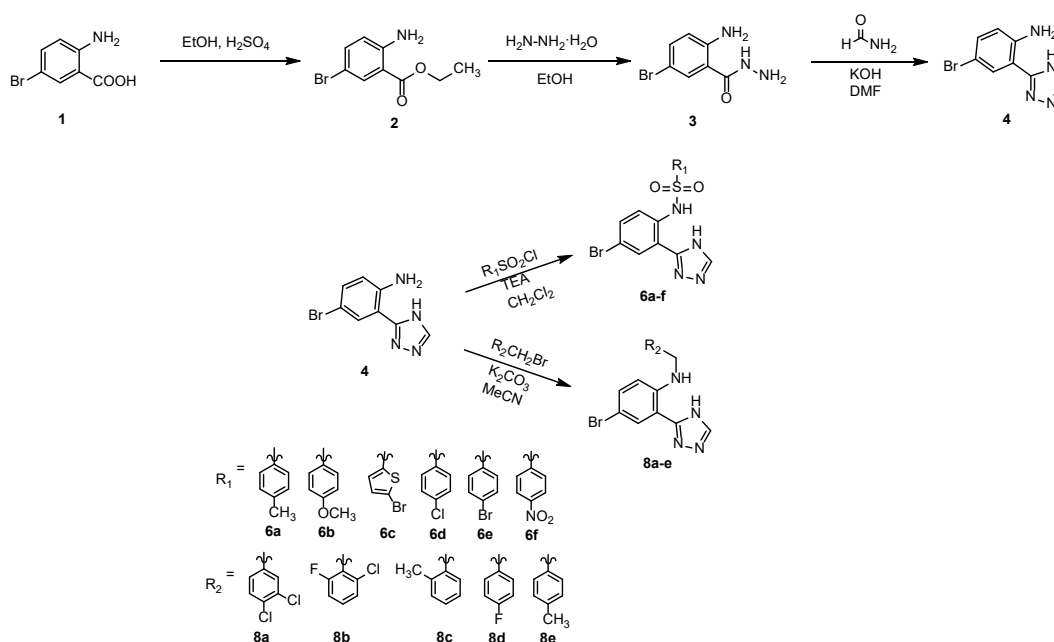
Związek	<i>E. coli</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>S. aureus</i>	<i>B. cereus</i>
3a	2,150 ± 0,165	1,300 ± 0,524	0,600 ± 0,139	0,630 ± 0,368
3b	2,080 ± 0,150	-	1,750 ± 0,446	2,100 ± 0,214
3c	3,140 ± 0,165	1,970 ± 0,475	2,290 ± 0,341	2,200 ± 0,141
3d	1,870 ± 0,342	-	0,270 ± 0,236	1,140 ± 0,154
3e	2,010 ± 0,295	-	2,340 ± 0,354	2,140 ± 0,291
3f	2,200 ± 0,178	-	1,960 ± 0,590	1,220 ± 0,219
3g	1,950 ± 0,206	-	1,950 ± 0,288	1,920 ± 0,249
<i>Penicylina</i>	-	-	2,000 ± 0,400	-
<i>Azytromycyna</i>	2,500 ± 0,419	-	-	3,000 ± 0,887
<i>Gentamycyna</i>	2,500 ± 0,501	1,900 ± 0,297	3,000 ± 0,610	3,000 ± 0,702
<i>Tetracyklina</i>	-	-	-	1,700 ± 0,355

Źródło: opracowanie własne na podstawie [35]

3.5. Synteza pochodnych 1,2,4-triazol-3-iloaniliny o działaniu przeciw pasożytniczym

Synteza zaproponowana przez Khan i wsp. prowadzi do otrzymania wielu pochodnych 1,2,4-triazolu, które przebadano pod kątem aktywności przeciw pasożytniczej oraz porównano ją z referencyjnym lekiem. Syntezę podzielono na 4 etapy, wychodząc z kwasu 2-amino-5-bromobenzoesowego (**1**), który poddano reakcji estryfikacji z etanolem, stosując jako katalizator stężony kwas siarkowy(VI). Mieszaninę reakcyjną ogrzewano w temperaturze 60°C przez 6 godzin. Otrzymany w ten sposób ester (**2**) poddano reakcji z roztworem wodzianu hydrazyny w etanolu, który ogrzewano do temperatury 60°C przez 8 godzin. Po ochłodzeniu mieszaniny reakcyjnej produkt główny (**3**) odsączono i wysuszono na powietrzu. W kolejnym etapie mieszaninę 2-amino-5-bromobenzohydrazynu (**3**) i formamidu w DMF ogrzewano w temperaturze 200°C w obecności sproszkowanego wodorotlenku potasu przez około 3 godziny. Postęp reakcji cyklizacji obserwowano za pomocą chromatografii TLC. Po usunięciu DMF produkt główny (**4**) ekstrahowano za pomocą octanu etylu i oczyszczono, wykorzystując rekrytalizację z metanolu. Strukturę otrzymanego związku potwierdzono za pomocą ¹H NMR i MS. Pochodną 4-bromo-2-(4*H*-1,2,4-triazol-5-ilo)aniliny (**4**) użyto do przeprowadzenia reakcji z pochodnymi chlorku benzenosulfonylu (**5a-f**) w obecności trietyloaminy i dichlorku metylenu jako rozpuszczalnika. Mieszaninę reakcyjną mieszano w temperaturze pokojowej przez około 30 minut. Postęp reakcji sprawdzano za pomocą TLC. Otrzymany stały produkt (**6a-f**) odsączono i oczyszczono za pomocą krystalizacji z 20%

etanolu. Pochodną 4-bromo-2-(4*H*-1,2,4-triazol-5-ilo)aniliny (**4**) poddano reakcji z pochodnymi bromku benzylu (**7a-e**). Reakcję prowadzono w acetonitrylu, w temperaturze 30°C, zachowując mieszanie przez około 10 godzin w obecności węgla potasu. Zakończenie reakcji potwierdzono, stosując chromatografię TLC. Po ekstrakcji z pomocą octanu etylu i następczym odparowaniu do sucha rozpuszczalnika otrzymano produkty końcowe w postaci alkilowych pochodnych 1,2,4-triazolu (**8a-e**). Związki te oczyszczono za pomocą rekrytalizacji z użyciem octanu etylu i *n*-heksanu w stosunku objętościowym 9:1. Struktury otrzymanych połączeń potwierdzono na podstawie o spektroskopii IR, ¹H i ¹³C NMR, MS oraz analizy elementarnej (rysunek 9) [36].



Rys. 9. Reakcja otrzymywania pochodnych (1,2,4-triazol-3-ilo)aniliny

Fig. 9. Reaction for obtaining (1,2,4-triazol-3-yl)aniline derivatives

Źródło: opracowanie własne na podstawie [36]

Autorzy przeprowadzili przesiewowe badania przeciwko *Pheretima posthuma* (dżdżownica indyjska) w celu zweryfikowania działania przeciwpasożytniczego. Wyniki wykazały, że podstawnik fluorowy w pozycji *para* pierścienia fenyłowego związanego z sulfamidem (**6d**) wykazuje silną aktywność. Paraliż rozpoczyna się po 37,45 minucie i powoduje śmierć w ciągu 40,03 minut. Podobną aktywność wykazywał związek **6f**, mający podstawnik nitrowy również w pozycji *para*. W tym przypadku paraliż rozpoczynał się po 38,83 minutach. Z kolei związki z drugiej grupy (**8a-e**) wykazywały umiarkowaną aktywność w odniesieniu do referencyjnego leku – Cytrynianu piperazy (tabela 5) [36].

Charakterystyka otrzymanych pochodnych 1,2,4-triazol-3-iloaniliny

Związek	Dawka [μg/μl]	Czas [min]	
		Paraliż	Śmierć
6a	50	59,98 ± 1,46	62,91 ± 1,26
6b	50	60,45 ± 0,27	61,68 ± 1,23
6c	50	59,12 ± 2,63	62,03 ± 0,60
6d	50	37,45 ± 0,27	40,03 ± 1,23
6e	50	60,97 ± 0,43	62,09 ± 1,02
6f	50	37,79 ± 0,29	38,83 ± 0,41
8a	50	64,51 ± 2,32	65,07 ± 1,16
8b	50	65,86 ± 0,21	66,77 ± 0,60
8c	50	63,03 ± 0,27	64,76 ± 0,28
8d	50	62,73 ± 0,24	64,98 ± 0,73
8e	50	65,03 ± 2,25	66,95 ± 1,22
<i>Cytrynian piperazyny</i>	50	47,00 ± 0,58	49,17 ± 0,48

Źródło: opracowanie własne na podstawie [36]

4. Podsumowanie

Znaczenie pochodnych 1,2,4-triazolu wykazujących cenną aktywność biologiczną stale rośnie. Struktury zawierające pierścień triazolowy znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, przede wszystkim w medycynie i farmacji jako skuteczne środki o działaniu przeciwbakteryjnym, przeciwgrzybiczym, przeciw pasożytniczym, przeciwnowotworowym czy przeciwzapalnym. Prace związane z opracowywaniem syntezy nowych, niepoznanych dotąd związków, opartych na strukturze 1,2,4-triazolu i mających cenną aktywność biologiczną, stale trwają. Przyczyniają się one do rozwoju medycyny i farmacji, poprawiając tym samym skuteczność walki z chorobami oraz patogenami wywołującymi choroby.

Bibliografia

1. Ji Ram V., Sethi A., Nath M., Pratap R., Five-Membered Heterocycles. The Chemistry of Heterocycles, Elsevier; 2019, p. 149–478.
2. Holm S.C., Straub B.F., Synthesis of n-substituted 1,2,4-triazoles. a review. Org Prep Proced Int, 2011,43,319–47.
3. Potts K.T., THE CHEMISTRY OF 1,2,4-TRIAZOLES. Chem Rev, 1961,61,87–127.

4. Sadeghpour H., Khabnadideh S., Zomorodian K., Pakshir K., Hoseinpour K., Javid N. et al., Design, synthesis, & biological activity of new triazole & nitro-triazole derivatives as antifungal agents. *Molecules*, 2017,22,1–11.
5. Huang L., Ding J., Li M., Hou Z., Geng Y., Li X., et al., Discovery of [1,2,4]-triazolo [1,5-a]pyrimidine-7(4H)-one derivatives as positive modulators of GABAA1 receptor with potent anticonvulsant activity and low toxicity. *Eur J Med Chem*, 2020,185,111824.
6. Mohan Krishna K., Inturi B., Pujar G.V., Purohit M.N., Vijaykumar G.S., Design, synthesis and 3D-QSAR studies of new diphenylamine containing 1,2,4-triazoles as potential antitubercular agents. *Eur J Med Chem*, 2014,84,516–29.
7. Gao F., Wang T., Xiao J., Huang G., Antibacterial activity study of 1,2,4-triazole derivatives. *Eur J Med Chem*, 2019,173,274–81.
8. Cao X., Wang W., Wang S., Bao L., Asymmetric synthesis of novel triazole derivatives and their in vitro antiviral activity and mechanism of action. *Eur J Med Chem*, 2017,139,718–25.
9. Abuo-Rahma G.E.D.A.A., Abdel-Aziz M., Farag N.A., Kaoud T.S., Novel 1-[4-(Aminosulfonyl)phenyl]-1H-1,2,4-triazole derivatives with remarkable selective COX-2 inhibition: Design, synthesis, molecular docking, anti-inflammatory and ulcerogenicity studies. *Eur J Med Chem*, 2014,83,398–408.
10. Vijesh A.M., Isloor A.M., Shetty P., Sundershan S., Fun H.K., New pyrazole derivatives containing 1,2,4-triazoles and benzoxazoles as potent antimicrobial and analgesic agents. *Eur J Med Chem*, 2013,62,410–5.
11. El-Sherief H.A.M., Youssif B.G.M., Bukhari S.N.A., Abdel-Aziz M., Abdel-Rahman H.M., Novel 1,2,4-triazole derivatives as potential anticancer agents: Design, synthesis, molecular docking and mechanistic studies. *Bioorg Chem*, 2018,76,314–25.
12. Radhika C., Venkatesham A., Sarangapani M., Synthesis and antidepressant activity of di substituted-5-Aryl-1,2,4- triazoles. *Medicinal Chemistry Research*, 2012,21,3509–13.
13. Chinthakindi P.K., Sangwan P.L., Farooq S., Aleti R.R., Kaul A., Saxena A.K. et al., Diminutive effect on T and B-cell proliferation of non-cytotoxic α -santonin derived 1,2,3-triazoles: A report. *Eur J Med Chem*, 2013,60,365–75.
14. Liu J., Liu Q., Yang X., Xu S., Zhang H., Bai R., et al., Design, synthesis, and biological evaluation of 1,2,4-triazole bearing 5-substituted biphenyl-2-sulfonamide derivatives as potential antihypertensive candidates. *Bioorg Med Chem*, 2013,21,7742–51.
15. Khabnadideh S., Rezaei Z., Pakshir K., Zomorodian K., Ghafari N., Synthesis and antifungal activity of benzimidazole, benzotriazole and aminothiazole derivatives. *Res Pharm Sci*, 2012,7,65–72.
16. Altntop M.D., Özdemir A., Turan-Zitouni G., Ilgn S., Atl Ö., Işcan G. et al., Synthesis and biological evaluation of some hydrazone derivatives as new anticandidal and anticancer agents. *Eur J Med Chem*, 2012,58,299–307.
17. Sadeghian S., Emami L., Mojaddami A., Khabnadideh S., Faghieh Z., Zomorodian K., et al., 1,2,4-Triazole derivatives as novel and potent antifungal agents: Design, synthesis and biological evaluation. *J Mol Struct*, 2023,1271,134039.

18. Haasnoot J.G., Mononuclear, oligonuclear and polynuclear metal coordination compounds with 1,2,4-triazole derivatives as ligands. *Coord Chem Rev*, 2000,200–202,131–85.
19. Mochida T., Shimizu H., Suzuki S., Akasaka T., Synthesis and properties of azole-substituted ferrocenes. *J Organomet Chem*, 2006,691,4882–9.
20. Zou R.Q., Cai L.Z., Guo G.C., A hydrogen-bonded 3D coordination network of CoII with 4-(p-benzyloxy)-1,2,4-triazole: Hydrothermal synthesis, characterization, crystal structure and emission property. *J Mol Struct*, 2005,737,125–9.
21. Arduengo A.J., Harlow R.L., Kline M., A Stable Crystalline Carbene. *J. Am. Chem. Soc.*, 1991,113,361–3.
22. Malinowska M., Hryniewicka A., Karbeny N-heterocykliczne – Synteza i Zastosowanie. *Wiadomości Chemiczne*, 2015,69,228–53.
23. Jin C., Twamley B., Shreeve J.M., Bis (polyfluoroalkyl) -Substituted 1, 1' -Methylenebis (imidazolium) and Bis (trifluoromethanesulfonyl) amides : Ionic Liquids Leading to Bis (N-heterocyclic carbene) Complexes of Palladium. *Organometallics*, 2005,3020–3.
24. Drake G., Hawkins T., Brand A., Hall L., McKay M., Vij A., et al., Energetic, low-melting salts of simple heterocycles. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2003,28,174–80.
25. Katritzky A.R., Rogers J.W., Witek R.M., Vakulenko A.V., Mohapatra P.P., Steel P.J., et al., Synthesis and characterization of blowing agents and hypergolics. *Journal of Energetic Materials*, 2007,25,79–109.
26. Ainsworth C, Jones R.G., Isomeric and Nuclear-substituted β -Aminoethyl-1,2,4-triazoles. *J Am Chem Soc*, 1955,77,621–4.
27. Petree H., Pociask J., Method for direct preparation for 1,2,4-triazole from hydrazine and formamide. US4267347A, 1981.
28. Nagata N., Nishizawa C., Kurai T., Method of producing 1,2,4-triazole. US6002015A, 1999.
29. Ainsworth C., 1,2,4-Triazole. *Organic Syntheses*, 1960,40.
30. Henry R., Finnegan W., An Improved Procedure for the Deamination of 5-Aminotetrazole. *J Am Chem Soc*, 1954,76,290–1.
31. Abramovitch R.A., Gibson H.H., Nguyen T., Olivella S., Solé A., Attempted generation and structure of the 4-(1,2,4-triazoyl) cation. *Tetrahedron Lett*, 1994,35,2321–4.
32. Hassan M.Z., Alsayari A., Asiri Y.I., Bin Muhsinah A., 1,2,4-Triazole-3-Thiones: Greener, One-Pot, Ionic Liquid Mediated Synthesis and Antifungal Activity. *Polycycl Aromat Compd*, 2023,43,167–75.
33. Erensoy G., Ding K., Zhan C.G., Çiftçi G., Yelekçi K., Duracık M. et al., Synthesis, in vitro and in silico studies on novel 3-aryloxymethyl-5-[(2-oxo-2-arylethyl)sulfanyl]-1,2,4-triazoles and their oxime derivatives as potent inhibitors of mPGES-1. *J Mol Struct*, 2023,1272.
34. Turkey A., Bayoumi A.H., Sherbiny F.F., El-Adl K., Abulkhair H.S., Unravelling the anticancer potency of 1,2,4-triazole-N-arylamide hybrids through inhibition of STAT3: synthesis and in silico mechanistic studies. *Mol Divers*, 2021,25,403–20.

35. Ghorbani S.S., Montazeri N., Zeydi M.M., Ghane M., Synthesis of Novel Tris-1,2,4-triazole Derivatives and Their Antibacterial Activity. Russian Journal of Organic Chemistry, 2021,57,605–10.
36. Khan G., Sreenivasa S., Govindaiah S., Chandramohan V.;Shetty P.R., Synthesis, biological screening, in silico study and fingerprint applications of novel 1, 2, 4-triazole derivatives. J Heterocycl Chem, 2020,57,2010–23.

SYNTEZA I ZASTOSOWANIE AKTYWNYCH BIOLOGICZNIE POCHODNYCH 1,2,4-TRIAZOLU

Streszczenie

1,2,4-triazole to grupa pięciocłonowych związków heterocyklicznych składających się z trzech atomów azotu i dwóch atomów węgla. Cząsteczki te mają hybrydyzację sp^2 i zdelokalizowane elektrony 6π , co wskazuje na ich aromatyczny charakter. Ze względu na różne rozmieszczenie heteroatomów wyróżnić można dwa izomery – 1,2,3-triazole i 1,2,4-triazole. Związki te zostały po raz pierwszy otrzymane i nazwane w 1885 roku przez Bładina, a odkrycie właściwości chwastobójczych i przeciwpadaczkowych doprowadziło do znacznego wzrostu zainteresowania tą grupą związków, zwłaszcza w przemyśle chemicznym. Wiele pochodnych 1,2,4-triazolu wykazuje szerokie spektrum aktywności biologicznej, w tym działanie przeciwgrzybicze, przeciwdrgawkowe, przeciwgruźlicze, przeciwbakteryjne, przeciwwirusowe, przeciwzapalne, przeciwbólowe, przeciwnowotworowe, przeciwdepresyjne, immunosupresyjne i hipotensyjne. Flukonazol i Worykonazol, które wykazują działanie przeciwgrzybicze, są przykładem związków opartych na jednostce 1,2,4-triazolu, powszechnie stosowanych w leczeniu różnych rodzajów infekcji grzybiczych. Niektóre 1,2,4-triazole są również używane w rolnictwie jako herbicydy, a ich zdolność do tworzenia wiązań koordynacyjnych pozwala na tworzenie metaloorganicznych i *N*-heterocyklicznych karbenów. 1,2,4-triazole są również stosowane przy produkcji materiałów wybuchowych i paliw. Praca zawiera przegląd metod syntezy, właściwości i zastosowań wybranych związków zawierających w swej strukturze ugrupowanie triazolowe.

Słowa kluczowe: 1,2,4-triazol, synteza, medycyna, farmacja

SYNTHESIS AND APPLICATION OF BIOLOGICALLY ACTIVE DERIVATIVES OF 1,2,4-TRIAZOLE

Abstract

1,2,4-triazoles are a group of five-membered heterocyclic compounds consisting of three nitrogen atoms and two carbon atoms. These molecules have sp^2 hybridization and delocalized 6π electrons, indicating their aromatic character. Due to the different distribution of heteroatoms, two isomers can be distinguished – 1,2,3-triazoles and 1,2,4-triazoles. These compounds were first obtained and named in 1885 by Bladin, and the discovery of herbicidal and antiepileptic properties led to a significant increase in interest in this group of compounds, especially in the chemical industry. Many 1,2,4-triazole derivatives exhibit a broad spectrum of biological activity, including antifungal, anticonvulsant, antituberculous, antibacterial, antiviral, anti-inflammatory, analgesic, anticancer, antidepressant, immunosuppressive, and hypotensive effects. Fluconazole and Voriconazole, which exhibit antifungal activity, are examples of compounds based on the 1,2,4-triazole unit, commonly used in the treatment of various types of fungal infections. Some 1,2,4-triazoles are also used in agriculture as herbicides, and their ability to form coordination bonds allows the formation of organometallic and *N*-heterocyclic carbenes. 1,2,4-triazoles are also used in the production of explosives and fuels. The work contains a review of synthesis methods, properties and applications of selected compounds containing a triazole group in their structure.

Keywords: 1,2,4-triazole, synthesis, medicine, pharmacy

Wojciech MIKOŁEJKO¹

SYMULACJA KOMPUTEROWA WPLYWU MATERIAŁU WYKORZYSTANEGO DO PRODUKCJI STREFY ZGNIOTU W SAMOCHODZIE OSOBOWYM NA BEZPIECZEŃSTWO KIEROWCY

1. Wstęp

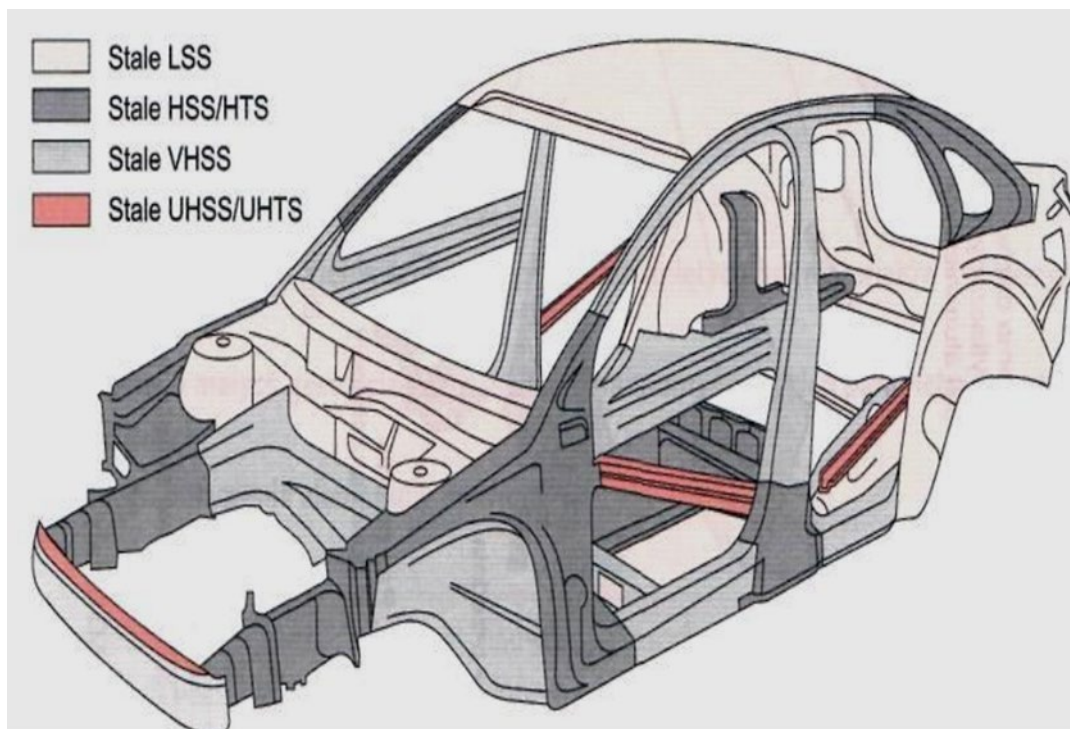
Symulacja komputerowa niesie ze sobą wiele korzyści, które związane są z możliwością przeniesienia testów rzeczywistych do świata wirtualnego. Pozwala to na oszczędność czasu oraz pieniędzy przez walidację wyrobów, komponentów bez zużycia prawdziwych produktów. Oszczędność jest także zauważalna przez brak potrzeby konserwacji urządzeń laboratoryjnych czy testowych oraz przeprowadzania testów na tych urządzeniach. Coraz to nowszy oraz wydajniejszy sprzęt komputerowy pozwala na coraz to bardziej zaawansowane symulacje komputerowe, do których można zaliczyć symulacje zderzeń, wibroakustycznych, przepływów ciepła czy gazu. Z technik tych korzystają niemalże wszystkie branże, od tych na co dzień spotykanych, poprzez takie jak automotive, przemysł transportowy czy lotniczy aż po te najbardziej zaawansowane, takie jak: przemysł militarny, kosmiczny i budowlany. Systemy CAx (Computer Aided) dzielą się na różne segmenty – CAD (Computer Aided Design) modelowanie, CAE (Computer Aided Engineering) wspomaganie inżynierskie, CAM (Computer Aided Manufacturing) produkowanie i wiele więcej [1-5].

Prace CAE w świecie symulacji dzielą się na kilka etapów, z których wyszczególnić należy przygotowanie modelu do symulacji (preprocessing), rozwiązanie wcześniej przygotowanego modelu (solver) oraz obróbka otrzymanych wyników (postprocessing). Do przygotowania modelu należy jego uproszczenie, tj. usunięcie zbędnych zaokrągleń, otworów czy żeber, nałożenie warunków brzegowych takich jak nałożenie siatki 2D oraz 3D, zastosowanie powierzchni kontaktowych modelu, nałożenie sił, mas i własności materiałowych. Solver rozwiązuje za nas zadane uprzednio warunki brzegowe i pokazuje nam otrzymane wyniki, które można definiować, zmieniać czy dodawać nowe na podstawie otrzymanych danych [6-10].

¹ Wojciech.Mikolejko@polsl.pl, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska

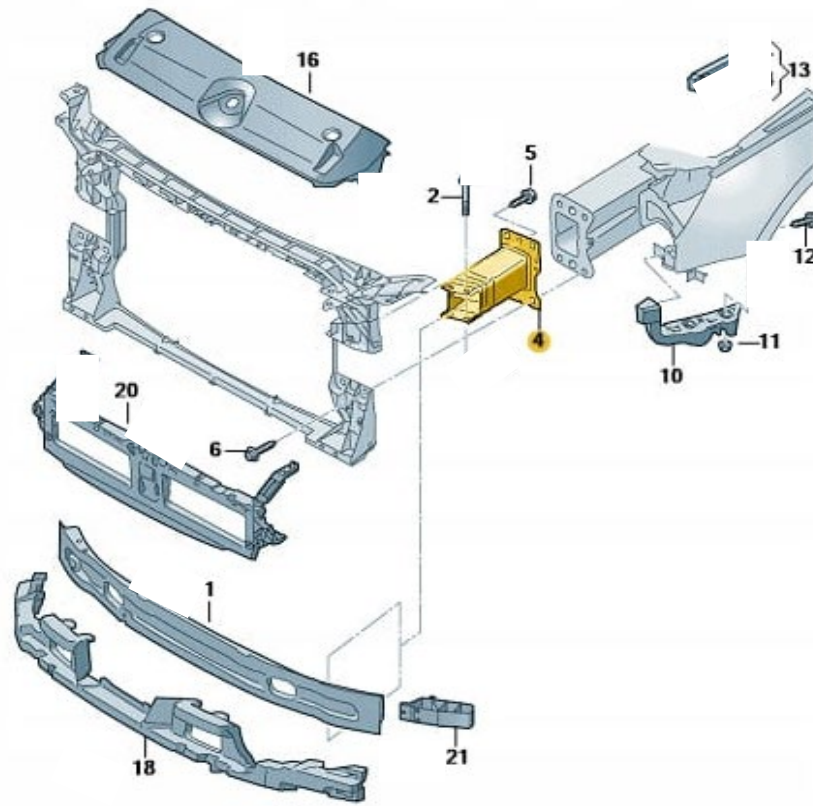
W przemyśle automotive symulacja komputerowa odgrywa istotną rolę ze względu na ogrom części, komponentów oraz ogromnej liczby testów, którym każdy element samochodu musi zostać poddany, dodatkowym czynnikiem są restrykcyjne wymagania stawiane przez marki samochodowe, dzięki którym samochody stają się bardziej komfortowe, osiągają lepsze moce, stają się bardziej ergonomiczne, a co najważniejsze – są bezpieczniejsze w użytkowaniu zarówno dla kierowcy i pasażerów, jak i dla pieszych.

W konstrukcji samochodu wykorzystywanych jest wiele różnych materiałów, a jednym z nich są różne stale, co ukazano na rysunku pierwszym. Z kolei na rysunku drugim przedstawiono wygląd strefy zgniotu samochodu osobowego [11-13].



Rys. 1. Zastosowanie różnych gatunków stali w budowie współczesnych nadwozi [13]

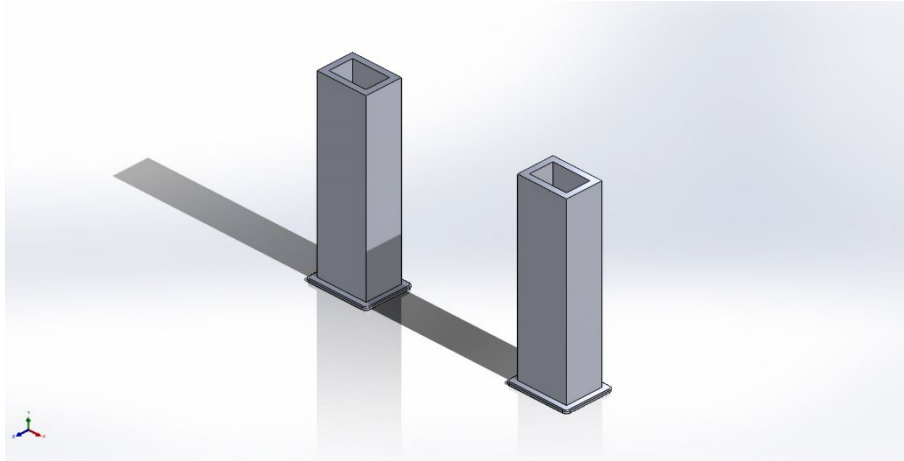
Fig. 1. The use of various steel grades in the construction of modern bodies [13]



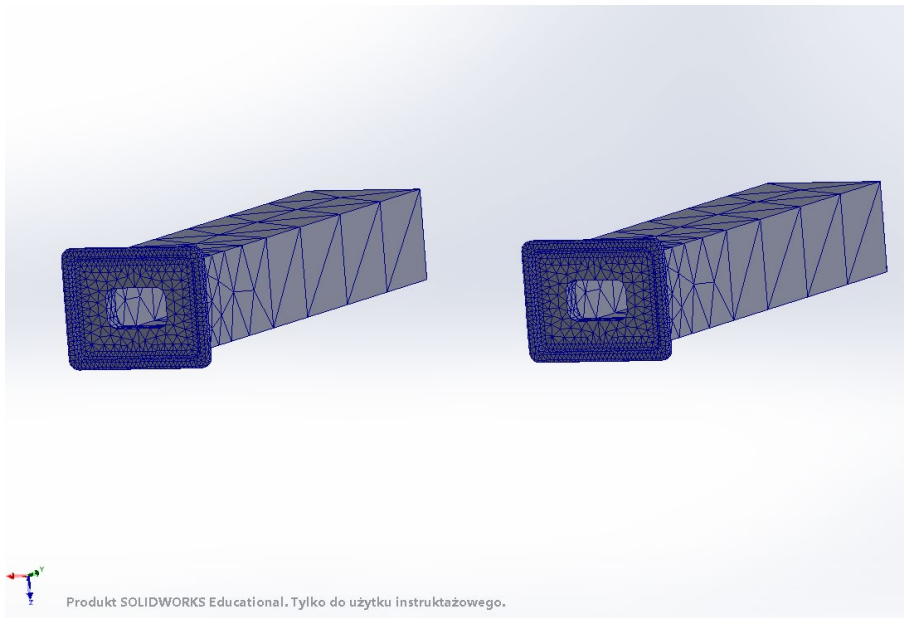
Rys. 2. Strefa zgniotu samochodu osobowego [14]
 Fig. 2. Crush zone of a passenger car [14]

2. Przygotowanie do symulacji – preprocessing

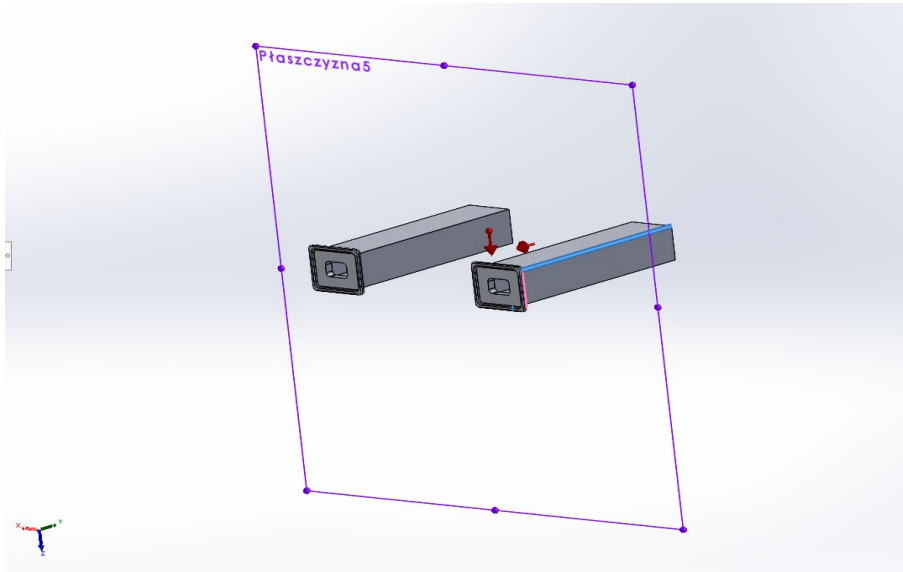
Przedmiotem pracy była strefa zgniotu w samochodzie osobowym (rys. 3), która odpowiada w samochodzie za przyjęcie znacznej ilości siły i naprężeń podczas kolizji samochodu. Jej zadaniem jest zapewnienie bezpieczeństwa kierowcy. W pracy porównano, jak materiał wpłynął na rozwój bezpieczeństwa samochodów. W wyniku rozwoju przemysłu automotive oraz inżynierii materiałowej przestano produkować strefy zgniotu ze zwyczajnej stali i zaczęto ją wykonywać z stali ultrawytrzymałej, o dużo większej granicy plastyczności. Właściwości materiałów użytych w symulacji przedstawiono w tabeli 1. Po zamodelowaniu strefy zgniotu przystąpiono do przygotowania modelu do symulacji. Nałożono siatkę elementów skończonych (rys. 4), zatwierdzono kierunek ruchu do sztywnej płaszczyzny oraz przypisano prędkość w momencie zderzenia 50 km/h, co odpowiada około 13,89 m/s. Zatwierdzono również warunki grawitacji ziemskiej, co przedstawiono na rysunku piątym.



Rys. 3. Model geometryczny strefy zgniotu
Fig. 3. Geometric model of the crumple zone



Rys. 4. Model geometryczny z nałożoną siatką elementów skończonych
Fig. 4. Geometric model with a mesh of finite elements



Rys. 5. Model geometryczny wraz z płaszczyzną uderzenia i warunkami brzegowymi
 Fig. 5. Geometric model with impact plane and boundary conditions

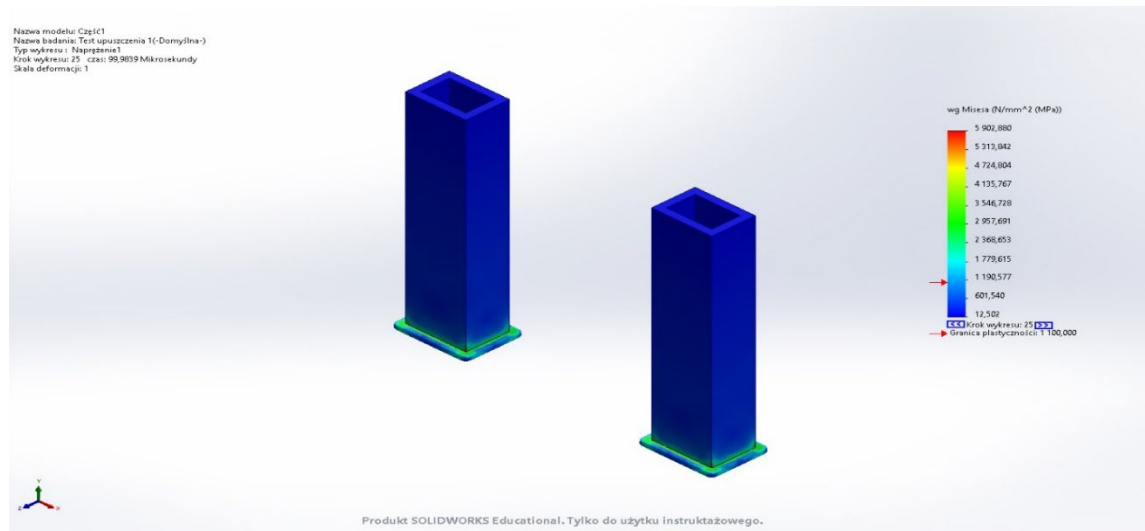
Tabela 1

Własności materiałów użytych w symulacji

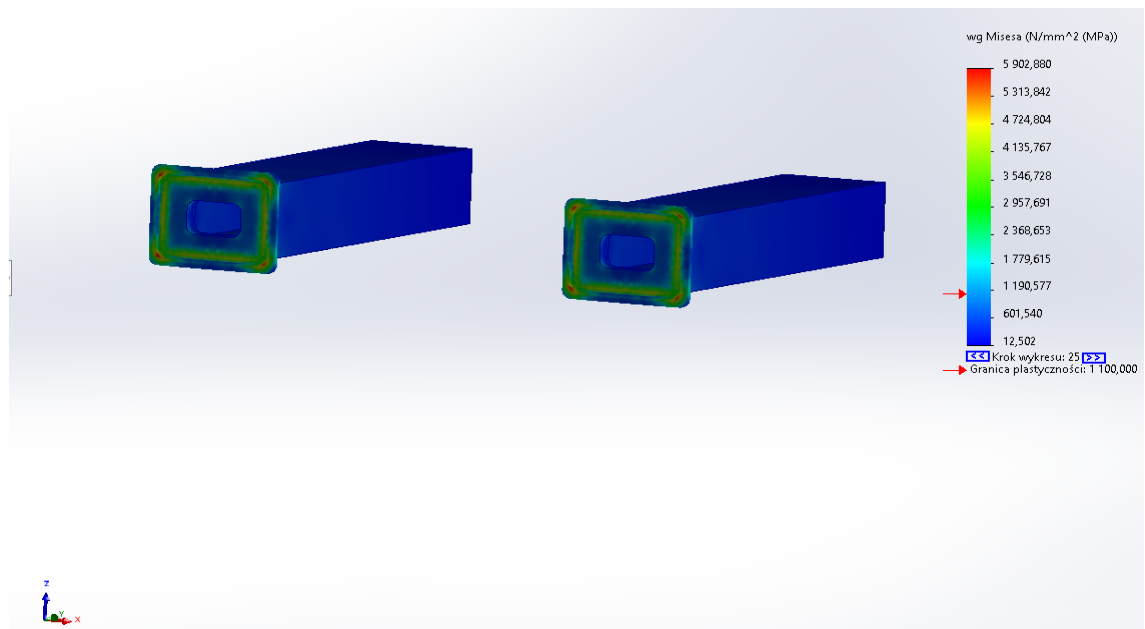
	Granica plastyczności	Współczynnik Poissona
Stal	2,06807e+08 N/m ²	0,29
Stal ultrawytrzymała	1,1e+09 N/m ²	0,27

3. Wyniki symulacji

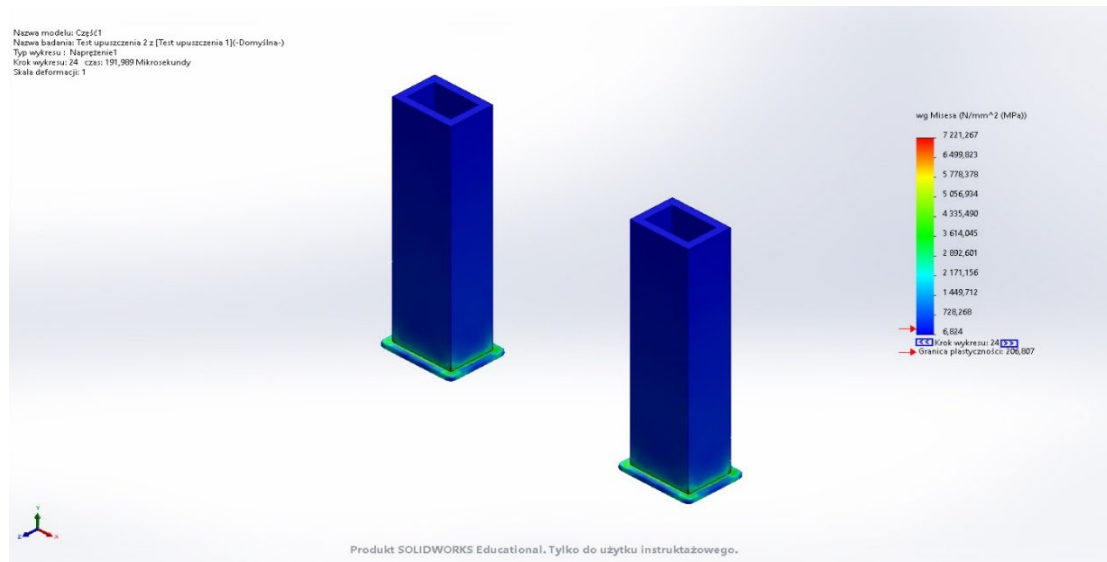
Poniższe rysunki przedstawiają wyniki symulacji zderzenia strefy zgniotu bez uwzględnienia innych części samochodu osobowego. Rysunki szósty i siódmy ukazują wyniki symulacji komputerowej dla modelu wykonanego z stali UHSS oraz zarejestrowane naprężenia, których wartość maksymalna wynosi 5902,880 [MPa]. Rysunki ósmy i dziewiąty z kolei przedstawiają wyniki naprężeń modelu wykonanego z stali, gdzie maksymalne naprężenia wynoszą 7221,267 [MPa]. Najwyższe naprężenia w obu przypadkach znajdują się w czołowej części strefy zgniotu, od strony uderzenia. Wyniki zestawiono w tabeli nr 2.



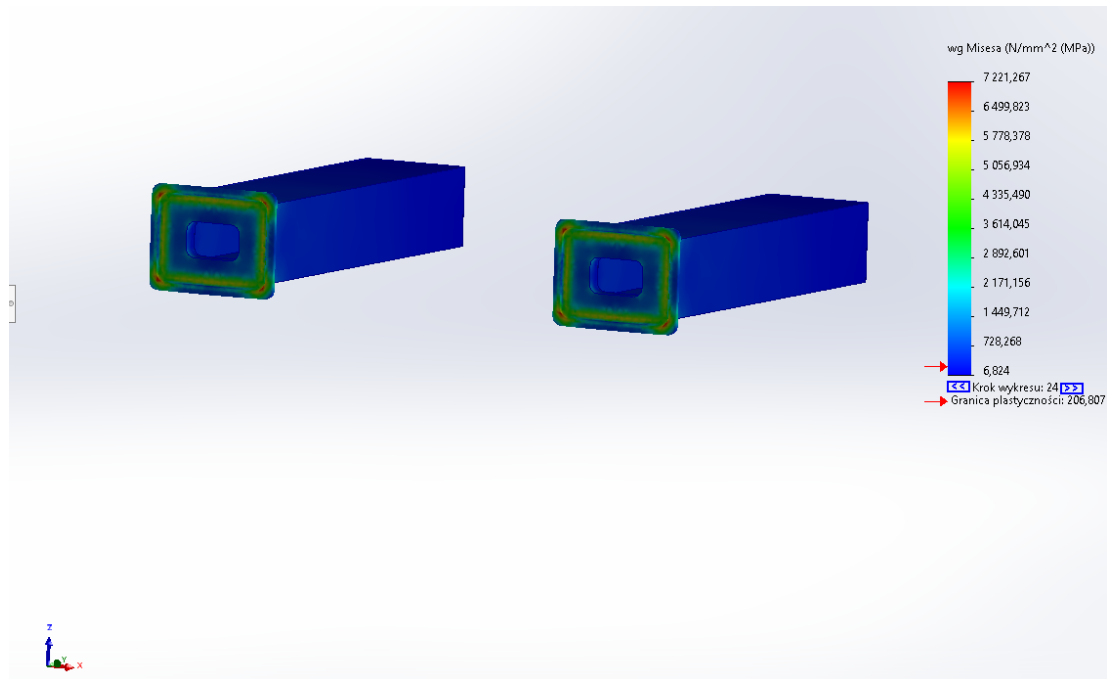
Rys. 6. Rozkład naprężeń powstałych w modelu wykonanym ze stali ultrawytrzymałej
 Fig. 6. Stress distribution in the model made of ultra-high-strength steel



Rys. 7. Rozkład naprężeń w czołowej części strefy zgniotu wykonanej ze stali ultrawytrzymałej
 Fig. 7. Stress distribution in the front part of the crumple zone made of ultra-high-strength steel



Rys. 8. Rozkład naprężeń powstałych w modelu wykonanym ze stali
 Fig. 8. Distribution of stresses arising in the model made of steel



Rys. 9. Rozkład naprężeń w czołowej części strefy zgniotu wykonanej ze stali
 Fig. 9. Stress distribution in the front part of the crumple zone made of steel

Tabela 2

Wyniki maksymalnych naprężeń

	Granica plastyczności
Stal	7221,267 [MPa]
Stal ultrawyttrzymała	902,880 [MPa]

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie zebranych wyników można stwierdzić, że zastosowanie materiałów o wyższej granicy plastyczności pozwala na obniżenie występujących naprężeń podczas zderzenia. Różnica na poziomie około 1300 [MPa] przemawia na korzyść strefy zgniotu wykonanej z UHSS, zatem wykorzystanie lepszych materiałów pozwala na zapewnienie większego bezpieczeństwa kierowcy podczas wypadku. Prace w przemyśle automotive ciągle się rozwijają i poprawie będzie ulegać wiele czynników bezpieczeństwa czy ergonomii samochodów, co jest możliwe dzięki zastosowaniu materiałów o lepszych własnościach oraz, co ważne, w przypadku przemysłu motoryzacyjnego materiałów lżejszych.

Maksymalne naprężenia zarejestrowane:

- UHSS – 5902,880 [MPa],
- Stal – 7221,267 [MPa].

Bibliografia

1. O. Zienkiewicz: Finite Element Method. Arkady, Warszawa 1972.
2. J. Domański: SolidWorks 2014. Designing machines and structures. Practical examples. Helion, Gliwice, 2015.
3. S. Zaharee, J.M. Rohani, K.Y. Wong: Application of computer simulation experiment and response surface methodology for productivity improvement in a continuous production line: Case study. Journal of King University – Engineering Sciences 30 (2018) 207-217.
4. K. Nordlund: Historical review of computer simulation of radiation effects in materials. J. Nucl. Mater. 520 (2019) 273-295.
5. A. Śliwa, M. Bonek: Application Of Finite Element Method (Fem) For Definition Of The Relationship Between Properties Of Laser Alloyed Steel Surface Layer. Metalurgia. Volume 56. Issue 1-2. Published 2017. Page 223-225.
6. M. Bonek, A. Sliwa, J. Mikula: Computer simulation of the relationship between selected properties of laser remelted tool steel surface layer. Applied Surface Science. Volume 388. PartA. Page174-179 DOI10.1016/j.apsusc.2016.01.256.
7. J.M. Duran, Computer Simulations in Science and Engineering.: Springer, Cham, 2018
8. L.W. Zukowska, A. Sliwa, J. Mikula, M. Bonek, W. Kwaśny, M. Sroka, D. Pakula: Finite element prediction for the internal stresses of (i,Al)N coatings. Archives of metallurgy and materials Volume 61. Issue 1. Page 149-152. DOI10.1515/amm-2016-0027.
9. L.A. Dobrzański, A. Śliwa, W. Kwaśny: Employment of the finite element method for determining stresses in coatings obtained on high-speed steel with the PVD proces. Journal Of Materials Processing Technology. Volume164. Page1192-1196. DOI10.1016/j.jmatprotec.2005.02.134.

10. N. Lavanya, P. Sampath Rao, M. Pramod Reddy: Design and Analysis of A Suspension Coil Spring For Automotive Vehicle. N.Lavanya et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 4, Issue 9 (Version 5), September 2014, pp. 151-157.
11. D. Abdul Budan, T.S. Manjunatha: Investigation on the Feasibility of Composite Coil Spring for Automotive Applications Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering Vol. 4, No. 10, 2010.
12. https://pl.wikipedia.org/wiki/Strefa_zgniotu
13. <http://www.pcez-bytow.pl>
14. <https://all24.pl>

SYMULACJA KOMPUTEROWA WPŁYWU MATERIAŁU WYKORZYSTANEGO DO PRODUKCJI STREFY ZGNIOTU W SAMOCHODZIE OSOBOWYM NA BEZPIECZEŃSTWO KIEROWCY

Streszczenie

Praca zawiera opis symulacji komputerowej wykonanej metodą elementów skończonych. Tematem pracy była strefa zgniotu samochodu osobowego oraz to, jak zmiana materiału na przestrzeni lat wpłynęła na bezpieczeństwo użytkowników ruchu drogowego. Została wykonana symulacja uderzenia z prędkością 50 km/h w nieruchomą i sztywną płaszczyznę.

Słowa kluczowe: inżynieria materiałowa, automotive, CAE, symulacje, FEA

COMPUTER SIMULATION OF THE IMPACT OF THE MATERIAL USED FOR THE CRUMPLE ZONE IN A PASSENGER CAR ON DRIVER SAFETY

Abstract

The paper describes a computer simulation performed using the finite element method. The topic of the paper was the crumple zone of a passenger car and how the change of material over the years affected the safety of road users. A simulation of an impact at a speed of 50km/h on a stationary and rigid plane was performed.

Keywords: materials engineering, automotive, CAE, simulation, FEA

Paweł PAC¹, Jarosław TOKARCZYK², Dariusz PROSTAŃSKI², Agnieszka SĘKALA³,
Piotr ROSIKOWSKI¹

ALTERNATYWNA METODA ANALIZY WYNIKÓW SYMULACJI MES W OPROGRAMOWANIU CAD BEZ ZAAWANSOWANYCH NARZĘDZI POSTPROCESINGU

1. Wprowadzenie

Współcześnie oprogramowanie CAD (Computer Aided Design) jest nieodłącznym elementem w projektowaniu i inżynierii mechanicznej, który znacząco skraca czas niezbędny do opracowania dokumentacji technicznej nowego urządzenia. Dzięki temu narzędziu projektanci mogą tworzyć przestrzenne modele geometryczne, przeprowadzać symulacje z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES), analizować wytrzymałość układów technicznych poddanych obciążeniom, prezentować koncepcje produktów oraz opracowywać dokumentację wykonawczą [1-4]. Wybór odpowiedniego oprogramowania CAD stanowi kluczową dla firm decyzję, ponieważ ma bezpośredni wpływ na proces projektowania oraz jakość, wytrzymałość, wagę i wydajność produktów. W tym kontekście firmy podejmują decyzje o zakupie oprogramowania, uwzględniając m.in.: specyfikę branży, typ oferowanych produktów, poziom zaawansowania technologicznego oraz przede wszystkim rachunek ekonomiczny.

Analiza wyników symulacji MES jest ważnym etapem procesu projektowania inżynierskiego, ponieważ pozwala niskim nakładem kosztów prowadzić weryfikację i ocenę różnych postaci konstrukcyjnych jeszcze przed wykonaniem prototypu. Jednakże nie wszystkie oprogramowania CAD oferują zaawansowane narzędzia do postprocesingu i analizy wyników, co często utrudnia skuteczne wykorzystanie symulacji MES w procesie projektowania [5-8]. W niniejszym artykule zaproponowano alternatywną metodę analizy wyników symulacji MES w oprogramowaniu CAD bez zaawansowanych narzędzi postprocesingu.

¹ pawel.pac@ponar-wadowice.pl, piotr.rosikowski@ponar-wadowice.pl, PONAR Wadowice S.A., www.ponar-wadowice.pl

² jtokarczyk@komag.eu, dprostanski@komag.eu, Jednostka naukowa, Wydział, Uczelnia, www.komag.eu

³ agnieszka.sekala@polsl.pl, Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/rmt2/>

1.1. Podział oprogramowania klasy CAD

Podziału oprogramowania CAD na kategorie można dokonać na różne sposoby, tj. w zależności od celów takiej klasyfikacji [9]:

- zastosowanie – oprogramowanie CAD może być stosowane do projektowania różnych typów obiektów, takich jak budynki, infrastruktura drogowa, urządzenia mechaniczne, elektroniczne itp.,
- poziom zaawansowania – oprogramowanie CAD różni się również poziomem zaawansowania i skomplikowania funkcjonalności, więc można je podzielić na narzędzia przeznaczone dla początkujących, zaawansowanych lub profesjonalnych użytkowników,
- modelowanie 2D/3D – oprogramowanie CAD może oferować narzędzia do rysowania obiektów dwuwymiarowych (2D) lub modelowania trójwymiarowych (3D), co stanowi podstawową cechę oprogramowania CAD,
- sposób dystrybucji – oprogramowanie CAD może być dystrybuowane jako aplikacja desktopowa, w chmurze lub jako oprogramowanie darmowe,
- branża docelowa – oprogramowanie CAD może być przeznaczone dla różnych branż, takich jak architektura, inżynieria, przemysł mechaniczny lub elektroniczny.

Ogólny podział oprogramowania CAD na kategorie może być dokonany z uwzględnieniem kryteriów takich jak cel zastosowania, poziom zaawansowania, modelowanie 2D lub 3D, sposób dystrybucji i branża docelowa. Oprogramowanie CAD w obszarze inżynierii mechanicznej może zostać podzielone w zależności od poziomu zaawansowania i zastosowania, jak również od ceny w następujący sposób:

- oprogramowanie CAD 3D dla początkujących – to oprogramowanie jest stosunkowo proste w obsłudze i ma ograniczone funkcje, ale jest odpowiednie dla początkujących projektantów, którzy nie potrzebują zaawansowanych funkcji do modelowania (np. FreeCAD, SketchUp czy Fusion 360);
- średnio zaawansowane oprogramowanie CAD 3D – ta kategoria obejmuje oprogramowanie CAD, które oferuje więcej funkcji i możliwości modelowania niż oprogramowanie dla początkujących (np. SolidWorks, SolidEdge, Inventor, Creo);
- zaawansowane oprogramowanie CAD 3D – przeznaczone dla zaawansowanych użytkowników, którzy potrzebują wysokiej precyzji i funkcjonalności w swoich projektach (m.in. CATIA, Siemens NX czy Pro/ENGINEER, Inventor Nastran);
- specjalne oprogramowanie do symulacji MES oprogramowanie to umożliwia – przeprowadzenie analizy numerycznej MES (metoda elementów skończonych) i symulacji wytrzymałościowej przy wykorzystaniu modeli 3D (np. Ansys, Abaqus, Comsol Multiphysics. Hexagon Patran/Nastran).

1.2. Wybór oprogramowania

W przedsiębiorstwach produkcyjnych wybór odpowiedniego oprogramowania CAD jest kluczowy dla skutecznej i efektywnej pracy inżynierów. Warto jednak pamiętać, że decyzja ta powinna być podejmowana na podstawie wielu kryteriów, które uwzględniają specyfikę branży, typ projektowanych produktów, budżet czy też poziom zaawansowania technologicznego wyrobów.

Jednym z głównych kryteriów, które wpływają na wybór oprogramowania CAD w przedsiębiorstwach, jest jego cena. Firmy często zatrudniają wielu inżynierów, co wymaga zakupu licencji oprogramowania dla każdego z nich. W związku z tym cena oprogramowania oraz koszty związane z licencjonowaniem mogą mieć znaczny wpływ na decyzję o wyborze oprogramowania. Sposób licencjonowania jest kolejnym ważnym kryterium. Firmy mogą wybierać między darmowymi narzędziami, licencjami wieczystymi lub subskrypcjami. Darmowe narzędzia mogą być atrakcyjne ze względu na brak kosztów, ale zwykle oferują mniejszą funkcjonalność niż narzędzia płatne. Licencje wieczyste pozwalają na korzystanie z oprogramowania przez nieokreślony czas bez konieczności ponoszenia dodatkowych kosztów, natomiast subskrypcje umożliwiają korzystanie z najnowszych wersji oprogramowania, ale wymagają regularnego opłacania abonamentu. Istotnym kryterium jest również dopasowanie narzędzi w oprogramowaniu. Oprogramowanie klasy CAD może być nastawione na szybkie projektowanie bryłowe części do obróbki mechanicznej, konstrukcji ramowych, części blaszanych, powierzchniowych lub produkcji form. Wybór narzędzi powinien być dostosowany do potrzeb i wymagań przedsiębiorstwa. Dodatkowe moduły, takie jak MES, symulacja dynamiczna, rendering czy inne, również mogą mieć wpływ na wybór oprogramowania klasy CAD. Te dodatkowe narzędzia pozwalają na analizę i symulację produktu w trakcie projektowania, co może zwiększyć jakość projektu i przyspieszyć proces wytwarzania. Jednakże dodatkowe moduły zwykle wiążą się z dodatkowymi kosztami, co może wpłynąć na decyzję o ich zakupie. Podsumowując, wybór odpowiedniego oprogramowania CAD jest procesem złożonym i wymagającym uwzględnienia wielu kryteriów. Cena zakupu oprogramowania i sposób licencjonowania, dopasowanie narzędzi oraz dodatkowe moduły są tylko niektórymi z nich.

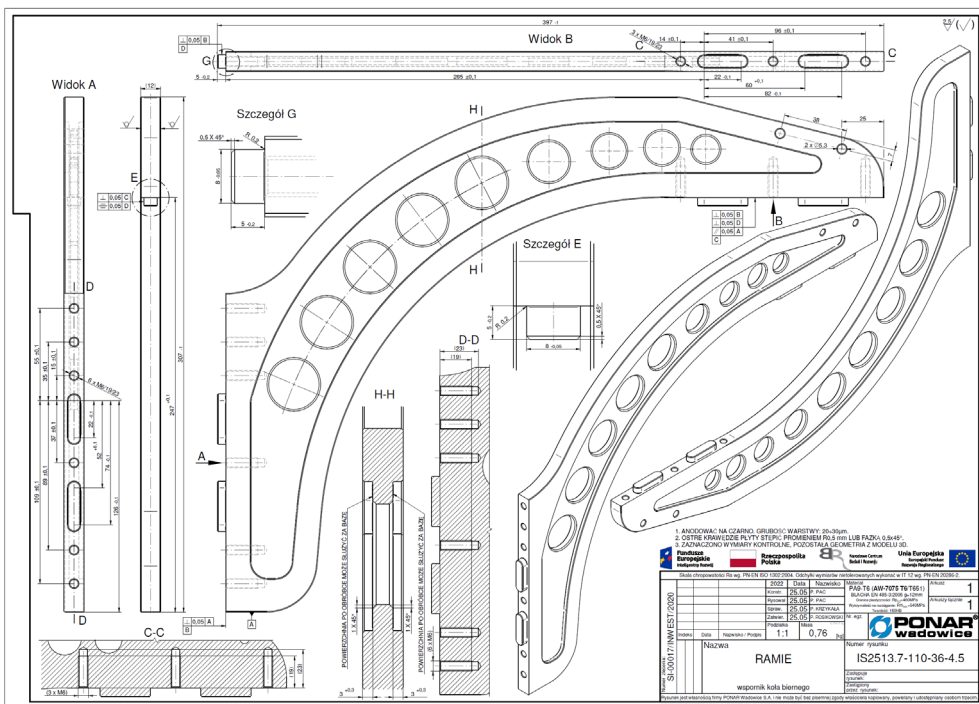
2. Analizowany element

W celu zilustrowania problemu możliwości zastosowania alternatywnych metod analizy wyników symulacji MES wybrano element koła biernego prototypu urządzenia, jakim jest robot magnetyczny do czyszczenia powierzchni ferromagnetycznych (rys. 2.1). Wybrany obiekt jest element ramienia, przedstawiony na rys. 2.2.



Rys. 2.1. Podwozie robota magnetycznego
Fig. 2.1. Magnetic robot chassis

Element koła biernego obciążony jest siłą odrzutu wywołaną pracą dysz w trakcie czyszczenia oraz momentem wynikającym z mimośrodowego sposobu zamocowania koła biernego.



Rys. 2.2. Podwozie robota magnetycznego
Fig. 2.2. Magnetic robot chassis

Przyjęto najbardziej niekorzystne warunki brzegowe, tj. najdłuższe ramię modułu czyszczącego z zamontowanymi trzema dyszami oraz ustawienie koła biernego pod kątem 90° .

2.1. Charakterystyka zastosowanego oprogramowania

Projekt robota magnetycznego powstał w oprogramowaniu Solid Edge 2020. Wcześniejsze analizy wytrzymałości i optymalizacji elementów robota magnetycznego wykonano w oprogramowaniu Autodesk Inventor 2017 Profesional. Z punktu widzenia potrzeb firmy PONAR Wadowice S.A. istotne było zweryfikowanie możliwości już posiadanego oprogramowania w stosunku do rozpoznanych potrzeb. W tym celu zostało ono zestawione z oprogramowaniem Hexagon Patran/Nastran, którego licencję badawczą ma Instytut Techniki Górniczej KOMAG.

Oprogramowanie Patran/Nastran jest rozbudowanym system do prowadzenia analiz wytrzymałościowych obiektów strukturalnych. Składa się z pre- oraz postprocesora (Patran), umożliwiającego kompleksowe przygotowanie zadania obliczeniowego, tzn. import modelu geometrycznego, przeprowadzenie jego dyskretyzacji (elementy jedno-, dwu- i trójwymiarowe różnych rzędów), definiowanie warunków brzegowych, modeli materiałów oraz wariantów obliczeń [10]. Na każdym etapie tworzenia siatki MES użytkownik ma do dyspozycji narzędzia wymuszające zapewnienie jej założonej jakości oraz narzędzia do weryfikacji siatki, która została utworzona. Środowisko Patran umożliwia przygotowanie danych do analiz statycznych, dynamicznych (w tym szybkozmiennych), w zakresie liniowym i nieliniowym i jest przeznaczone do rozbudowanych modeli obliczeniowych. Po przeprowadzonych obliczeniach program Patran dysponuje narzędziami do analizy wyników, takimi jak wyświetlanie wyników uśrednionych lub bez uśredniania, tworzenie płaszczyzn przekrojów, animacji, izopowierzchni oraz eksport wyników do różnych formatów. Z kolei program Nastran jest uznanym silnikiem obliczeniowym, którego kod źródłowy jest obecnie dostępny w wielu różnych programach, w tym CAD, jako funkcja wykonująca obliczenia wytrzymałościowe. Umożliwia prowadzenie obliczeń z zastosowaniem liniowych i nieliniowych modeli materiałów, w tym hiperelastycznych, a także rozwiązuje zadania statyczne oraz z uwzględnieniem zjawisk dynamicznych.

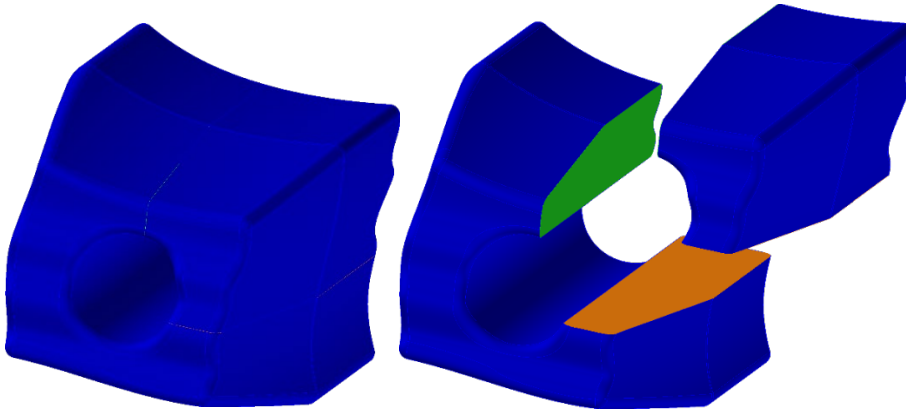
2.2. Alternatywna metoda postprocesingu

Oprogramowanie Autodesk Inventor Profesional zawiera wiele narzędzi i mechanizmów pozwalających szybko i sprawnie wykonać analizę naprężeń. Głównymi zaletami programu są m.in.: interfejs, sprawne generowanie siatki elementów skończonych (jakość, sporadyczne błędy łatwe do usunięcia), możliwość symulacji złożeń, sposób prezentacji wyników i możliwość generowania raportów w formacie HTML wg konfiguracji użytkownika. Jedynym ograniczeniem w zakresie liniowych obliczeń materiałów izotropowych jest brak możliwości dokonania przekroju modelu i oceny rozkładu naprężeń na powstałej płaszczyźnie.

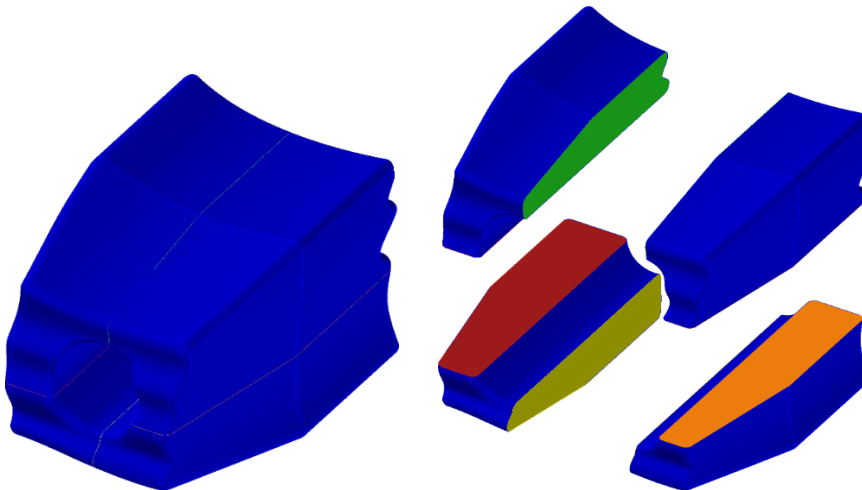
Analiza przekrojów pełnych brył w procesie postprocesingu symulacji MES jest ważnym krokiem w celu weryfikacji propagacji naprężeń do wnętrza bryły. Propagacja naprężenia

to proces, w którym naprężenie wywołane przez siłę zewnętrzną (np. obciążenie mechaniczne) rozprzestrzenia się przez materiał wewnątrz aż do osiągnięcia granicy materiału, gdzie może wystąpić pęknięcie lub odkształcenie. W przypadku symulacji MES propagacja naprężenia jest analizowana w celu zrozumienia, jakie obszary bryły są narażone na największe naprężenia i gdzie mogą wystąpić potencjalne problemy związane z wytrzymałością konstrukcji [11-13].

Teza, jaką postawiono w tym artykule, brzmi: symulację pojedynczej bryły można zastąpić symulacją naprężeń brył „rozciętych i sklejonych” ze sobą w płaszczyznach istotnych z punktu widzenia analizy (rys. 2.3, rys. 2.4).



Rys. 2.3. Bryła z wydzieloną ćwiartką
Fig. 2.3. Solid with a separate quarter



Rys. 2.4. Podział bryły na cztery ćwiartki
Fig. 2.4. Divided solid into four quarters

Środowisko MES programu Inventor oferuje różne typy kontaktów, które można zdefiniować pomiędzy bryłami w złożeniu. W celu potraktowania w symulacji kilku elementów jako jedną część zastosowano kontakt typu związany, który wiąże sztywno ze sobą powierzchnie kontaktu [14].

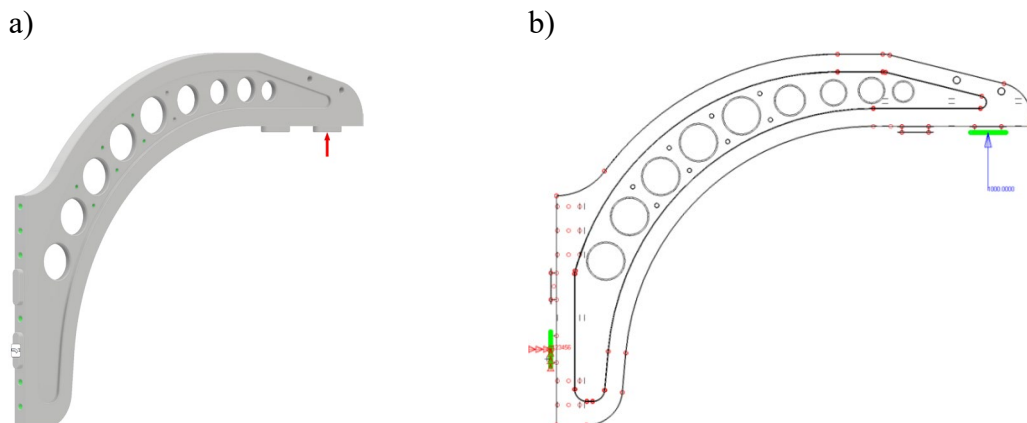
2.3. Warunki brzegowe

W pierwszym kroku przeanalizowano element (rys. 2.5) w całości w obu wymienionych wcześniej programach w celu weryfikacji, czy występuje zgodność rozkładu naprężenia i przemieszczeń. Sposób utwierdzenia elementu i przyłożenia siły przedstawiono na rys. 2.6. Na rys. 2.7 pokazano przemieszczenia w obu programach. Uzyskano wysoką zgodność, wynoszącą 3,545 mm dla programu Inventor i 3,53 mm dla programu Hexagon Patran.

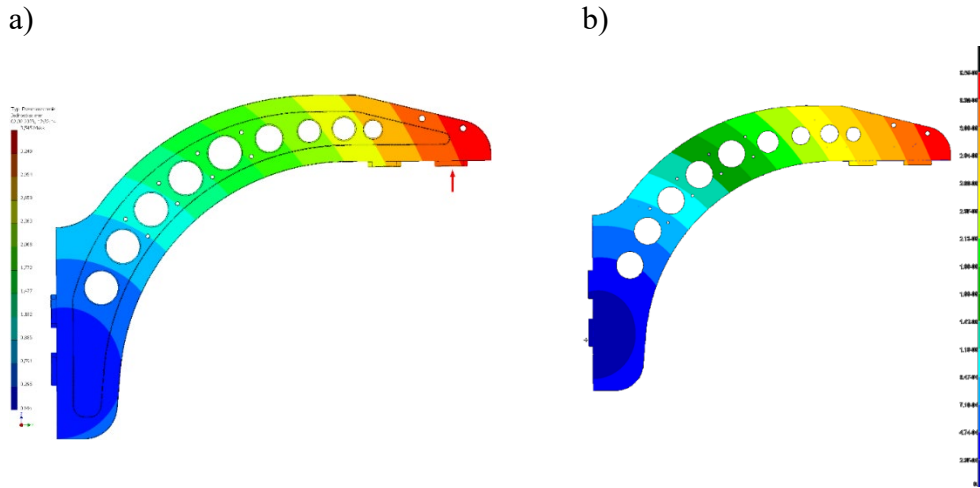
Na rys. 2.8 i rys. 2.9 zestawiono przykłady uzyskanych wyników rozkładu naprężenia zredukowanego. W celu lepszej prezentacji wyników ograniczono odpowiednio skalę do 100 MPa i 50 MPa. Niewielkie różnice w obrazach wyników wynikają z liczby przedziałów na skalach. W przypadku programu Inventor maksymalna liczba to 12 przedziałów, natomiast w przypadku oprogramowania Hexagon Patran jest możliwe ustawienie 15 przedziałów. Na rys. 2.10 przedstawiono wygenerowane w obu programach siatki MES. W programie Inventor utworzono 1 567 764 węzły i 1 060 299 elementów, w programie Hexagon Patran 1 512 396 węzłów i 1 039 081 elementów.



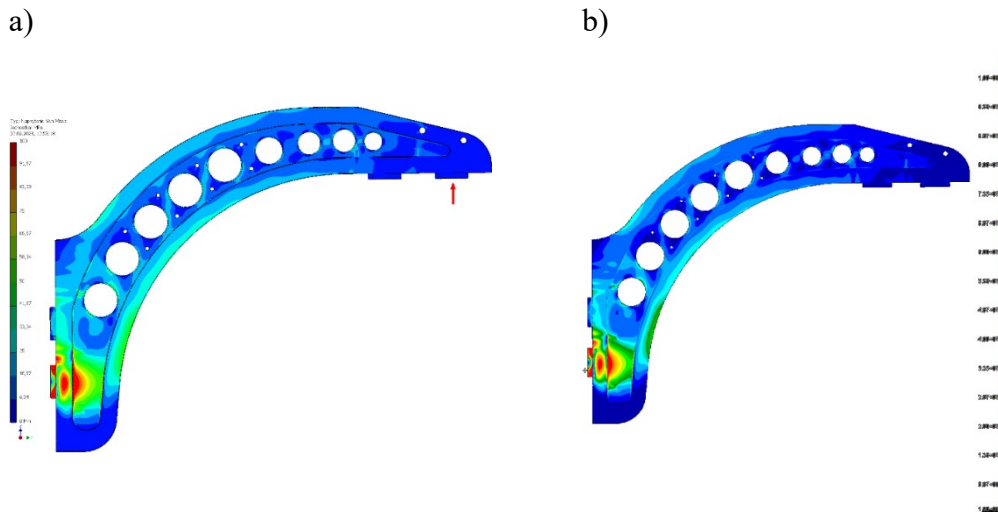
Rys. 2.5. Ramię koła biernego
Fig. 2.5. The idler arm



Rys. 2.6. Utwierdzenie sztywne i obciążenie w programie Inventor (a) i Hexagon Patran (b)
Fig. 2.6. Rigid restraint and loading in Inventor (a) and in Hexagon Patran (b)

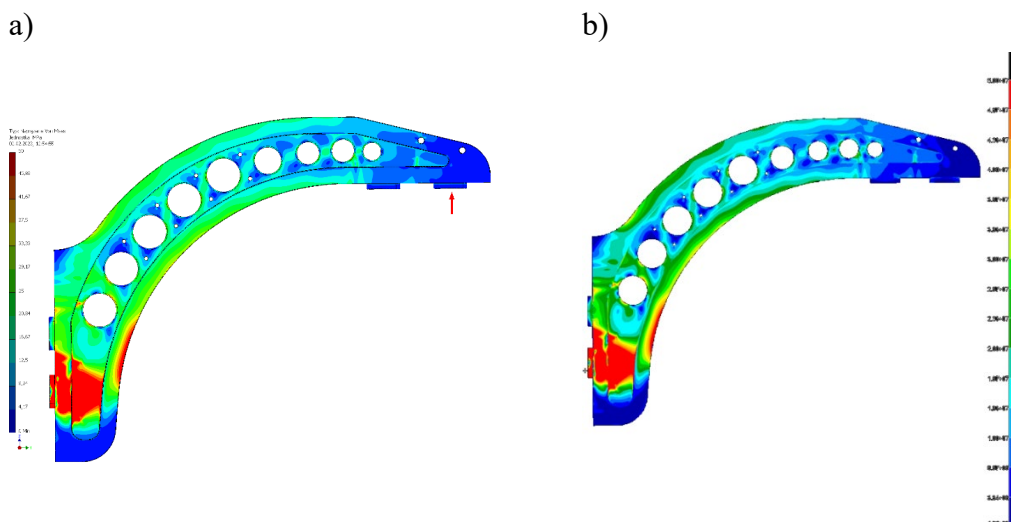


Rys. 2.7. Przemieszczenie w programie Inventor (a) i w Hexagon Patran (b)
 Fig. 2.7. Displacement in Inventor (a) and in Hexagon Patran (b)



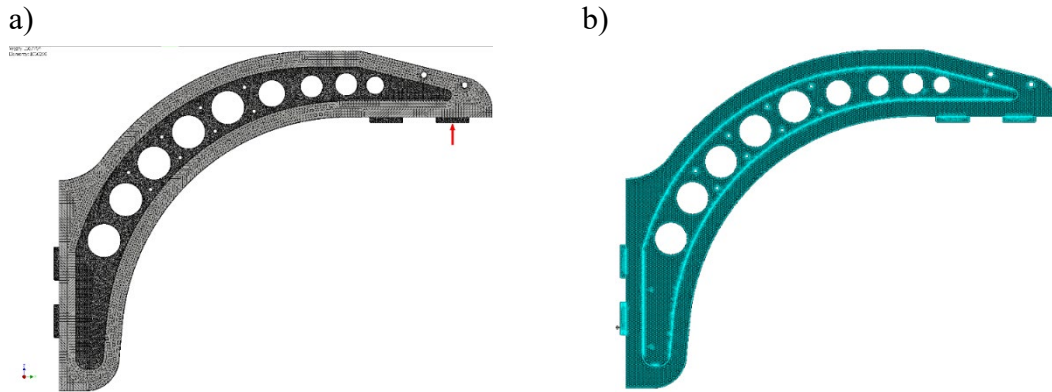
Rys. 2.8. Naprężenia w programie Inventor (a) i w Hexagon Patran (b), skala została ograniczona do 100 MPa

Fig. 2.8. Stresses in Inventor (a) and in Hexagon Patran (b), the scale was limited to 100 MPa



Rys. 2.9. Naprężenia w programie Inventor (a) i w Hexagon Patran (b), skala została ograniczona do 50 MPa

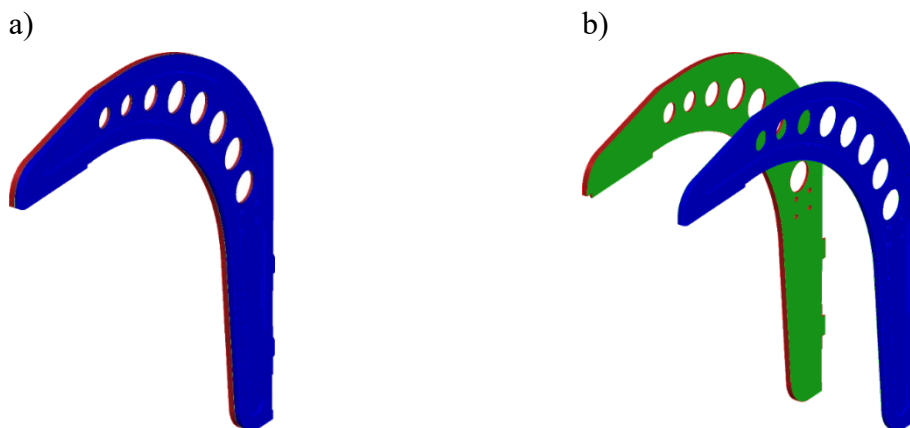
Fig. 2.9. Stresses in Inventor (a) and in Hexagon Patran (b), the scale was limited to 50 MPa



Rys. 2.10. Siatka elementów skończonych w programie Inventor (a) i w Hexagon Patran (b)
 Fig. 2.10. Finite element mesh in Inventor (a) and in Hexagon Patran (b)

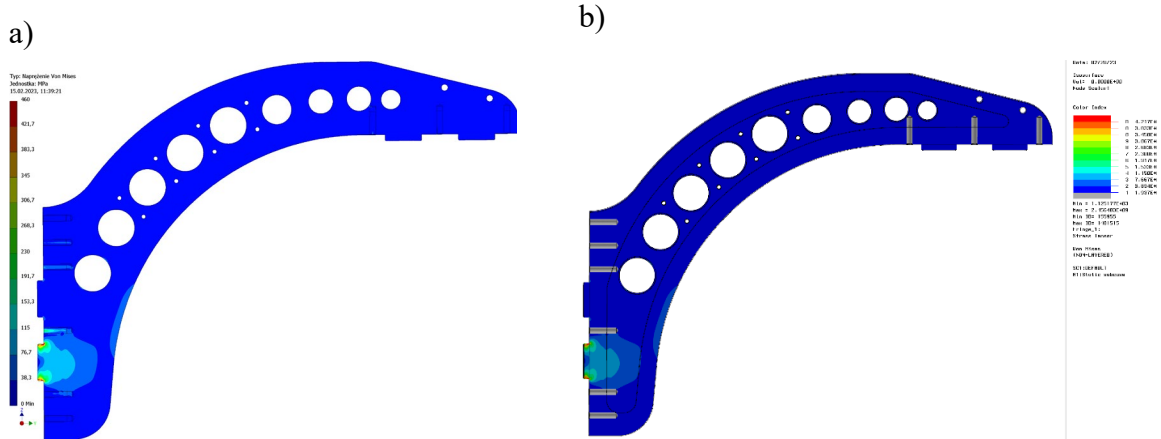
2.4. Analiza przekroju

Kolejnym krokiem procesu obliczeń numerycznych w dwóch różnych programach było przeprowadzenie symulacji sklejonego elementu (rys. 2.11) w programie Inventor i porównanie otrzymanych wyników odnośnie do wybranego przekroju z wynikami uzyskanymi z programu Hexagon Patran (w symulacji, w odniesieniu do pełnej bryły). Początkowe obliczenia przeprowadzono wyłącznie z zadanym obciążeniem w postaci siły. W kolejnym etapie dołożono dodatkowe obciążenie w formie momentu sił.



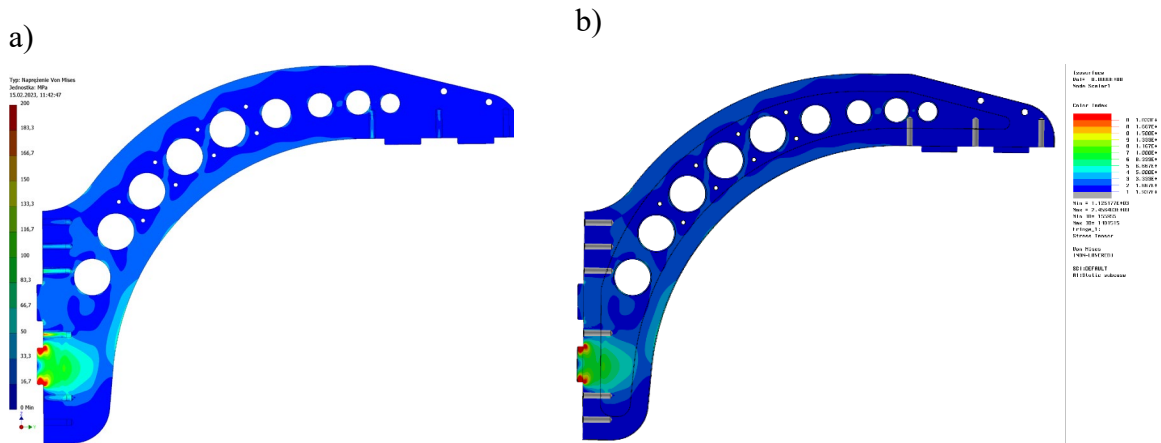
Rys. 2.11. Płaszczyzna podziału bryły
 Fig. 2.11. The solid dividing plane

Na rys. 2.12-2.15 przedstawiono porównanie rozkładu naprężenia na przekroju, otrzymane w dwóch różnych programach. W przypadku tych samych warunków brzegowych uzyskano wysoką zbieżność wyników.



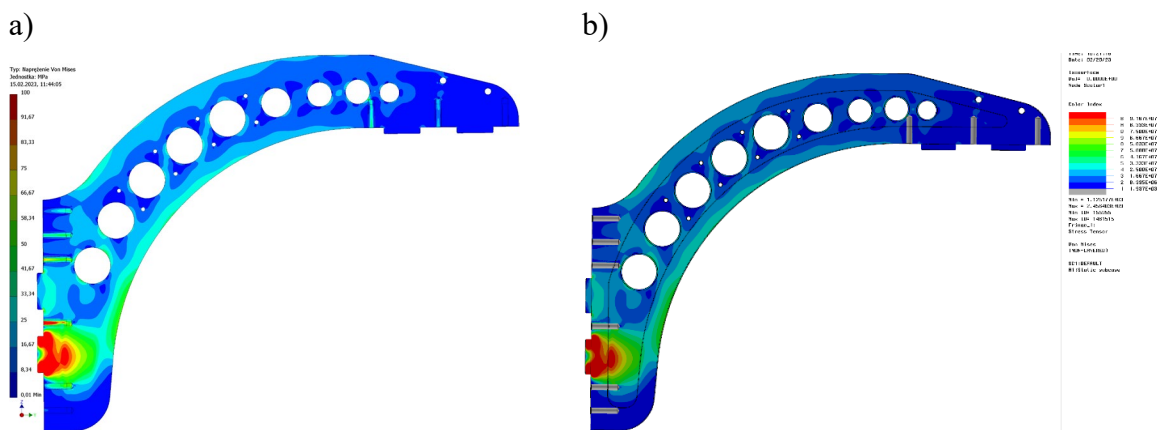
Rys. 2.12. Naprężenia na przekroju w programie Inventor (a) i Hexagon Patran (b), skalę ograniczono do 460 MPa

Fig. 2.12. Cross-sectional stresses in Inventor (a) and Hexagon Patran (b), the scale was limited to 460 MPa



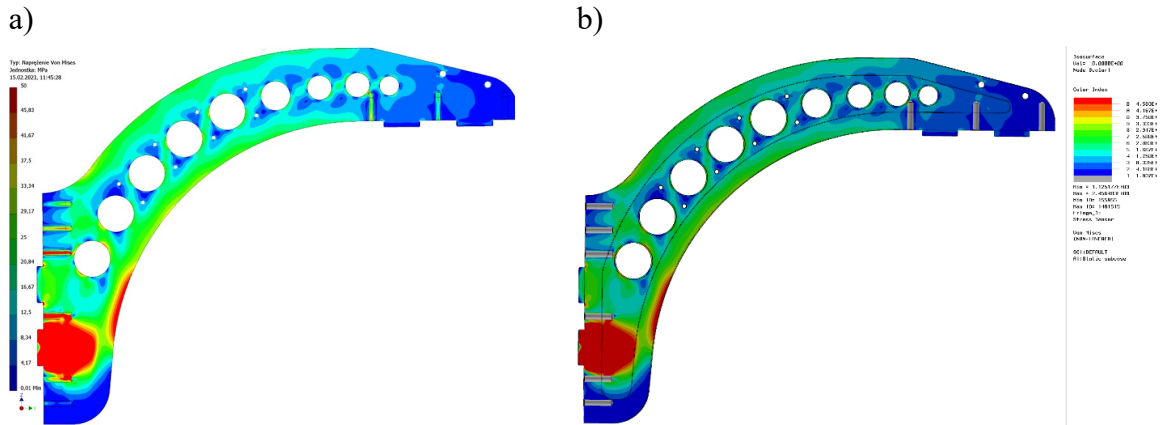
Rys. 2.13. Naprężenia na przekroju w programie Inventor (a) i Hexagon Patran (b), skalę ograniczono do 200 MPa

Fig. 2.13. Cross-sectional stresses in Inventor (a) and Hexagon Patran (b), the scale was limited to 200 MPa



Rys. 2.14. Naprężenia na przekroju w programie Inventor (a) i Hexagon Patran (b), skalę ograniczono do 100 MPa

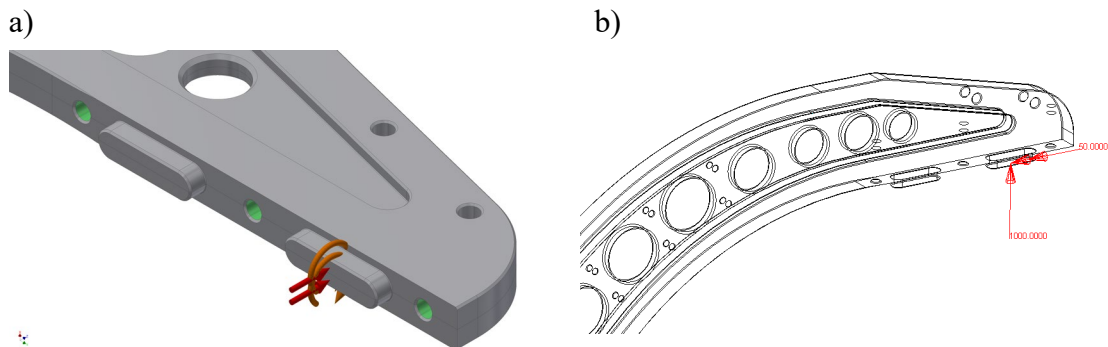
Fig. 2.14. Cross-sectional stresses in Inventor (a) and Hexagon Patran (b), the scale was limited to 100 MPa



Rys. 2.15. Naprężenia na przekroju w programie Inventor (a) i Hexagon Patran (b), skalę ograniczono do 50 MPa

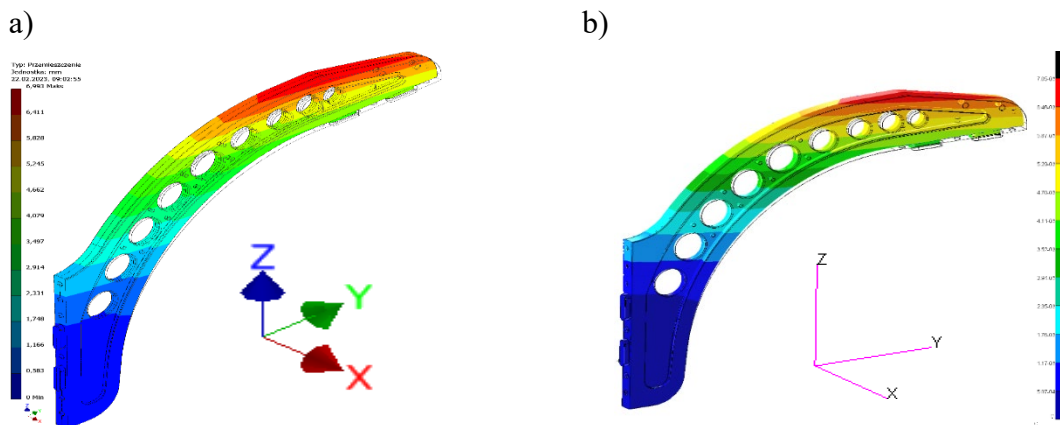
Fig. 2.15. Cross-sectional stresses in Inventor (a) and Hexagon Patran (b), the scale was limited to 50 MPa

Kolejna symulacja uwzględniała dodatkowe obciążenie w postaci momentu sił (rys. 2.16). Uzyskano nieco niższą (0,81%) zgodność przemieszczeń (rys. 2.17) obu programów, 6,993 mm (X: 6,315 | Y: 1,791 mm | Z: 3,701 mm) w przypadku programu Inventor i 7,05 mm (X: 6,37 | Y: 1,79 mm | Z: 3,71 mm) w przypadku Hexagon Patran.



Rys. 2.16. Miejsce przyłożenia siły i momentu siły do elementu w programie Inventor (a) i Hexagon Patran (b), skalę ograniczono do 50 MPa

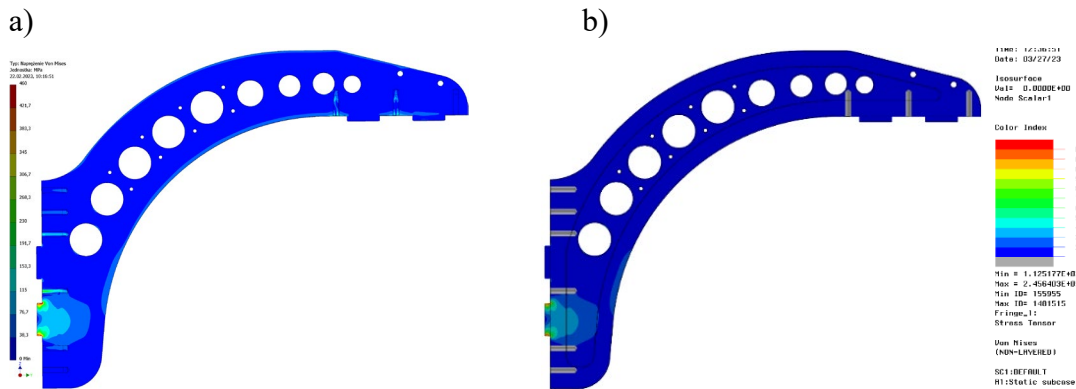
Fig. 2.16. The place where force and torque are applied to the element in Inventor (a) and Hexagon Patran (b), the scale was limited to 50 MPa



Rys. 2.17. Przemieszczenie w programie Inventor (a) i Hexagon Patran (b)

Fig. 2.17. Displacement in Inventor (a) and Hexagon Patran (b)

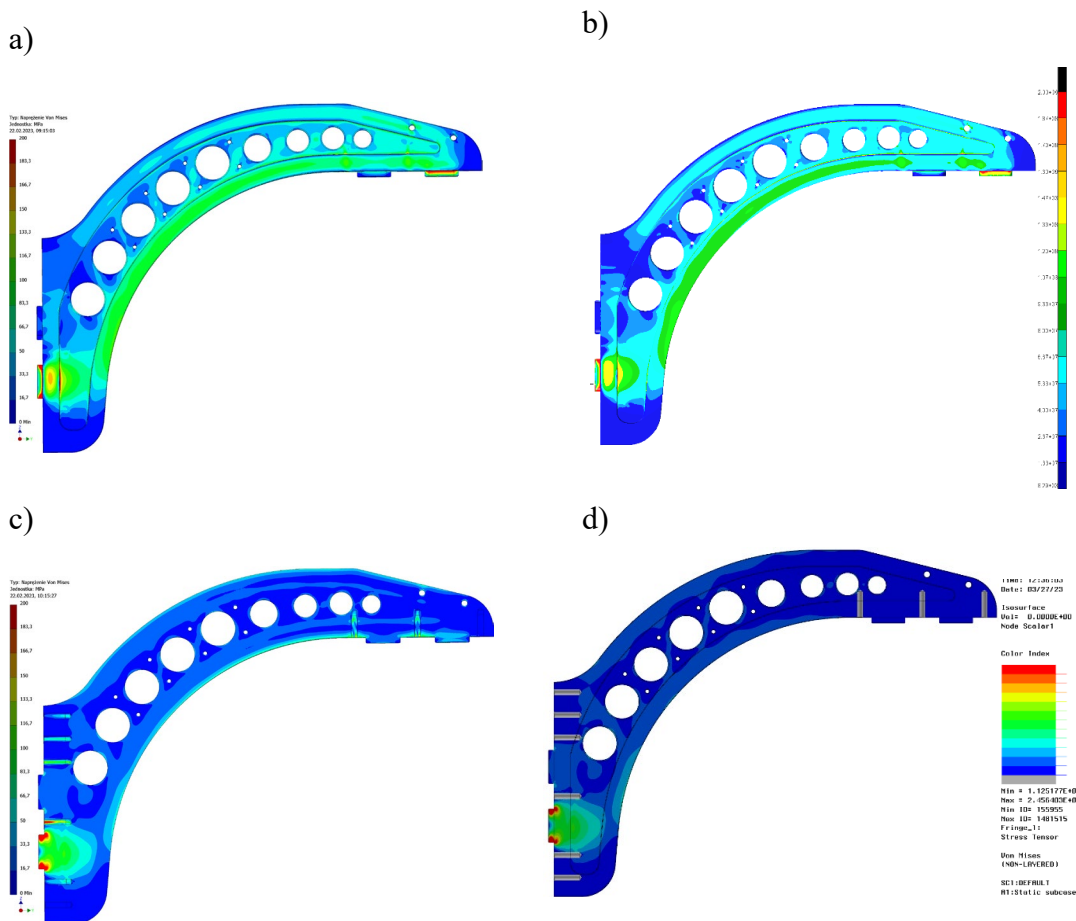
Na rys. 2.18 przedstawiono rozkład naprężenia zredukowanego w przekroju w odniesieniu do skali ograniczonej do 460 MPa.



Rys. 2.18. Naprężenia na przekroju w programie Inventor (a) i Hexagon Patran (b), skalę ograniczono do 460 MPa

Fig. 2.18. Cross-sectional stresses in Inventor (a) and Hexagon Patran (b), the scale was limited to 460 MPa

Rozkład naprężenia na zewnątrz elementu oraz na płaszczyźnie przekroju przedstawiono na rys. 2.19.



Rys. 2.19. Naprężenie (od zewnątrz "a" i "b", na przekroju "c" i "d") w programie Inventor ("a" i "c") i Hexagon Patran ("b" i "d"), skalę ograniczono do 200 MPa

Fig. 2.19. Stress (from the outside "a" and "b", on the section "c" and "d") in Inventor ("a" and "c") and Hexagon Patran ("b" and "d"), the scale was limited to 200 MPa

3. Wnioski

Rozkład naprężenia jest zgodny w akceptowalnym stopniu w obu programach. Istniejące drobne różnice rozkładu w poszczególnych programach wynikają głównie z kształtu generowanych siatek elementów skończonych. Jedyne zauważalne istotne różnice w wynikach dotyczą maksymalnych wartości naprężenia – w obu programach maksima znajdują się w tych samych miejscach, różnice wynikają z kształtu generowanych siatek. Rozkład przemieszczeń zgodny w obydwu przypadkach potwierdza poprawność wyników, z punktu widzenia przemieszczeń w przypadku tego typu bryły nie występuje potrzeba analizy przekroju.

Należy dodać, że w przypadku oprogramowania Hexagon Patran istnieje możliwość prowadzenia dalszych, bardziej zaawansowanych analiz numerycznych. Przykładowo, uzyskanie wyników wskazujących na możliwość przekroczenia granicy plastyczności w danym obszarze może być podstawą do przeprowadzenia tzw. obliczeń globalno-lokalnych. W tego typu zadaniach uzyskane wyniki z modelu obliczeniowego (globalnego) są w kolejnym kroku importowane jako warunki brzegowe do zadania lokalnego. Modele obliczeniowe zadań lokalnych są ukierunkowane na zdecydowanie wyższą jakość siatki MES analizowanego szczegółu. Dodatkowo w zadaniu lokalnym wprowadza się materiał sprężysto – plastyczny. W ten sposób dokonuje się oceny najbardziej wyťažonych miejsc konstrukcji bez konieczności dyskretyzacji całości, a uzyskane wyniki są kolejnym, dokładniejszym przybliżeniem uzyskanego wyniku obliczeń wytrzymałościowych.

Bibliografia

1. Barkanov E.: Introduction The Finite Elements Method. Institute of Materials and Structures Faculty of Civil Engineering, Riga Technical University, 2001.
2. Biernacki K.: Strength analysis for cycloidal gears with the new concept of power transmissions. *Mining Machines*, 2021, Vol. 39, Issue 4, pp. 25-36. DOI: 10.32056/KOMAG2021.4.1.
3. Rupik D., Romanyshyn L.: Concept of a drill press rotary tool workstation stand with a strength analysis. *Mining Machines*, 2021, Vol. 39 Issue 2, pp. 63-72. DOI: 10.32056/KOMAG2021.2.7.
4. Turczyński K., Stępor J., Gerlich J.: Estimation of strength properties of the UWZ-1 device for withdrawing the powered roof support. *Mining Machines*, No. 4/2020 (164), pp. 48-57. DOI: 10.32056/KOMAG2020.4.1.
5. Benzleya S.E., Merkleya K., Blackerb T.D., Schoofb L.: Pre- and post-processing for the finite element method. Elsevier, 1995, Vol. 19 Issue 4, pp. 243-260. DOI: 10.1016/0168-874X(94)00072-N.

6. Fang X-Y., Zhang H-N., Ma D-W. , Wu Z-J., Huang W.: Influence of welding residual stress on subsurface fatigue crack propagation of rail. Elsevier, 2022, Vol. 271. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108642 ISSN 0013-7944.
7. Mukhtar F.M., Duarte C.A.: Coupled multiphysics 3-D generalized finite element method simulations of hydraulic fracture propagation experiments. Elsevier, 2022, Vol. 276, Part A. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108874 ISSN 0013-7944.
8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., ZHU J.Z.: The Finite Element Method. Vol 1: Its Basis & Fundamentals. Vol 2: For Solid and structural mechanics. Sixth edition. Elsevier Butterworth – Heinemann, Oxford 2005.
9. Lyashenko V., Sotnik S., Manakov V.: Modern CAD/CAM/CAE Systems: Brief Overview. International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS), 2021, Vol. 5, Issue 11, pp. 32-40. ISSN 2643-640 X.
10. Ho-Le K.: Finite element mesh generation methods, a review and classification. Elsevier, 1988, Vol. 20, Issue 1, pp. 27-38. DOI: 10.1016/0010-4485(88)90138-8.
11. Geuzaine C., Remacle J-F.: Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. Numerical Methods in Engineering, 2009, Vol. 79, Issue 11, pp. 1309-1331. DOI: 10.1002/nme.2579.
12. Okodi A., Li Y., Cheng R., Kainat M., Yoosef-Ghodsi N., Adeb S.: Crack Propagation and Burst Pressure of Pipeline with Restrained and Unrestrained Concentric Dent-Crack Defects Using Extended Finite Element Method. Applied sciences, 2020, 10, 7554. DOI: 10.3390/app10217554.
13. Qiu S., Duan Q., Shao Y., Chen S., Yao W.: Adaptive finite element method for hybrid phase-field modeling of three-dimensional cracks. Elsevier, 2022, Vol. 271. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108636 ISSN 0013-7944.
14. Autodesk Inventor 2017 – Help.

ALTERNATYWNA METODA ANALIZY WYNIKÓW SYMULACJI MES W OPROGRAMOWANIU CAD BEZ ZAAWANSOWANYCH NARZĘDZI POSTPROCESINGU

Streszczenie

W artykule opisano znaczenie oprogramowania CAD (Computer Aided Design) w procesie projektowania układów technicznych z obszaru inżynierii mechanicznej. Autorzy podkreślają, że wybór odpowiedniego oprogramowania istotnie wpływa na proces projektowania i ma kluczowe znaczenie dla osiągniętej jakości, wydajności i wytrzymałości produktów. Analiza wyników symulacji MES (Metoda Elementów Skończonych) jest ważnym etapem w procesie

projektowania, jednak nie wszystkie środowiska programistyczne CAD oferują zaawansowane narzędzia do postprocesingu i analizy wyników. Autorzy artykułu proponują alternatywną metodę analizy wyników symulacji MES w oprogramowaniu CAD, bez konieczności użycia zaawansowanych narzędzi postprocesingu.

Słowa kluczowe: MES, systemy klasy CAD, postprocessing, magnetyczny robot mobilny

AN ALTERNATIVE METHOD OF ANALYZING FEM SIMULATION RESULTS IN CAD SOFTWARE WITHOUT ADVANCED POST-PROCESSING TOOLS

Abstract

The article describes the importance of CAD (Computer Aided Design) software in the process of designing technical systems in the field of mechanical engineering. The authors emphasize that the choice of the right software has a significant impact on the design process and is of key importance for the achieved quality, efficiency, and durability of products. Analysis of FEM (Finite Element Method) simulation results is an important step in the design process, but not all CAD development tools offer advanced post-processing and analysis tools. The authors of the article propose an alternative method of analyzing FEM simulation results in CAD software, without the need to use advanced post-processing tools.

Keywords: MES, CAD systems, postprocessing, magnetic mobile robot

Wiktorija PIĘTAKIEWICZ¹

PROCES WYTWARZANIA POSZYCIA FOTEŁA SAMOCHODOWEGO, DOBÓR I OCENA PARAMETRÓW WPLYWAJĄCYCH NA JAKOŚĆ POSZYCIA

1. Wstęp

Proces wytwarzania poszyć foteli samochodowych wymaga dużej precyzji i umiejętności osoby obsługującej maszynę do szycia. Wygoda, bezpieczeństwo oraz walory estetyczne wnętrza samochodu zależą bezpośrednio od jakości wykonanego poszycia. W produkcji poszyć używa się różnych materiałów, w tym skóry, tkanin, materiałów syntetycznych i elementów dekoracyjnych. Proces składa się z projektowania, cięcia, szycia i montażu, wymaga precyzyjnych ustawień maszyn oraz umiejętności artystycznych i technicznych operatorów.

Projektowanie ma ogromne znaczenie w procesach technologicznych, w trakcie projektowania określa się potrzeby i sposób ich realizacji. Projektanci muszą umiejętnie selekcjonować informacje i być kreatywni, aby osiągnąć założone w projekcie cele. Istotnym elementem projektowania jest dobór kryteriów procesu i opracowanie dokumentacji zawierającej wszystkie potrzebne informacje, takie jak krytyczne operacje i parametry szycia. Projekt musi być czytelny dla osób wykonujących poszycie, aby uniknąć błędów.

Aby poprawić proces projektowania, konieczne jest określenie działań mających na celu usprawnienie procesu i wdrożenie odpowiednich metod oraz narzędzi. W tym celu powinna powstać metodologia projektowania, która skupia się na świadomym przekształcaniu naszego otoczenia przez metody, procesy i środki projektowania.

Struktura procesu projektowania jest ogólna i może być zmieniana w zależności od wielu czynników, takich jak rodzaj problemu projektowego, struktura i właściwości projektowanego systemu, narzędzia dostępne dla projektanta, jego wiedza i zdolność rozwiązywania problemów.

¹ RMT, Politechnika Śląska.

Analiza teorii projektowania dostarcza różnych definicji, takich jak działanie podejmowane z celowym zamierzeniem rozwiązania problemu, proces składający się z kolejnych kroków, podejmowanie decyzji w sytuacjach niepewnych z poważnymi konsekwencjami, jeśli decyzja jest błędna, tworzenie systemu, który zapewnia realizację dobrze zdefiniowanej potrzeby lub funkcji. Charakter procesu projektowania zależy od celu, jakiemu ma służyć, i może podlegać różnym wahaniom oraz być postrzegany z różnych perspektyw.

2. Znaczenie jakości

Jakość jest rozumiana jako zbiór cech i właściwości, które odróżniają produkty i usługi od siebie. Uwzględniane są tylko te właściwości, które wynikają z potrzeby realizacji praktycznych zadań. Aby rozwiązać kwestię jakości, nie wystarczy zaostrenie kontroli, ale kluczowe jest odpowiednie zarządzanie przedsiębiorstwem. Wdrożenie formalnego systemu zarządzania jakością zgodnego z normą ISO 9001:2015 umożliwia strategiczne planowanie kierownictwa, zaangażowanie wszystkich pracowników i dostawców, spełnienie oczekiwań klientów i poprawę pozycji rynkowej oraz zwiększenie efektywności działań przedsiębiorstwa na każdym etapie tworzenia i istnienia produktu. Podczas oceny jakości produktu należy brać pod uwagę jego funkcjonalność oraz dodatkowe cechy uzupełniające poziom niezawodności, zgodność z normami, trwałość, wygląd, wrażenia dotykowe i jakość postrzeganą przez klienta. Jakość projektu zależy od związku między właściwościami produktu a potrzebami, jakie ma on zaspokoić. Jakość wykonania odnosi się do stopnia zgodności produktu z wymaganiami projektu i jest znana jako jakość projektowa, która dotyczy zarówno produktu, jak i procesu. Zarządzanie jakością opiera się na założeniu, że każda operacja procesu powinna być wykonywana poprawnie. Z kolei jakość techniczna jest wykorzystywana w analizie i nie uwzględnia elementów subiektywizmu, podczas gdy konsumenci interesują się jakością finalnego produktu, oceniając ją na podstawie swojej satysfakcji z usługi.

Jakość poszyc foteli samochodowych jest niezwykle istotna dla producentów samochodów i klientów, ponieważ wpływa ona na wygodę i estetykę wnętrza pojazdu oraz jego wartość rynkową. Wysokiej jakości poszycia foteli są nie tylko estetyczne, lecz także trwałe i wytrzymałe, co jest szczególnie istotne w przypadku samochodów używanych przez wiele lat.

Aby zapewnić wysoką jakość, konieczne jest zastosowanie precyzyjnych narzędzi oraz wymaga to umiejętności technicznych i artystycznych pracowników. Materiały wykorzystywane do produkcji poszyc, takie jak skóra, tkaniny i materiały syntetyczne, muszą spełniać wysokie standardy jakościowe. Producenci samochodów wybierają dostawców poszyc, którzy gwarantują trwałość i odporność na ścieranie. Jakość wykonanych poszyc wpływa na wizerunek i wartość rynkową samochodów, dlatego producenci samochodów

przykładają dużą wagę do poszyc oferowanych w swoich pojazdach. Klienci coraz bardziej zwracają uwagę na wykonanie wnętrza samochodu, w tym na jakość poszyc foteli, co sprawia, że producenci muszą dbać o najwyższą jakość swoich produktów.

3. Proces wytwarzania

Prototypowe wytwarzanie poszycia fotela samochodowego jest ważnym etapem w procesie produkcji, ponieważ pozwala na weryfikację projektu i testowanie materiałów. Wykorzystywane są różne narzędzia Lean Manufacturing, które usprawniają produkcję oraz minimalizują straty.

POKA YOKE jest metodą wykorzystywaną w produkcji, która ma na celu eliminowanie błędów ludzkich przez zastosowanie specjalnych mechanizmów lub procedur kontrolnych. W przypadku produkcji poszyc foteli samochodowych POKA YOKE może być stosowane na różnych etapach procesu produkcyjnego, aby zapewnić jakość i niezawodność końcowego produktu. Na etapie szycia można zastosować mechanizmy, które zapobiegają przemieszczaniu się tkaniny lub skóry podczas szycia, co może prowadzić do nierównomiernych szwów lub niedoskonałości w wykończeniu. Dzięki temu producenci poszyc foteli samochodowych mogą zwiększyć swoją efektywność, obniżyć koszty i poprawić jakość swoich produktów.

Wytwarzanie prototypu poszycia fotela samochodowego zaczyna się od wykonania projektu poszycia, który może być stworzony w oprogramowaniu CAD lub ręcznie na papierze. Następnie projekt zostanie przekazany do produkcji prototypowej, gdzie na podstawie wzoru wykonywana jest próbna sztuka poszycia.

Po wykonaniu poszycia jest ono dokładnie testowane pod kątem trwałości, wytrzymałości i wyglądu. Jeśli prototypowe poszycie spełnia wymagania, to jest ono uznawane za model referencyjny do produkcji seryjnej. W przypadku potrzeby wprowadzenia zmian projekt poszycia jest korygowany, a proces wytwarzania prototypów jest powtarzany aż do uzyskania możliwie idealnego prototypu.

Prototypowe wytwarzanie poszycia fotela samochodowego jest kluczowe dla zapewnienia wysokiej jakości produktu końcowego. Dzięki temu procesowi producenci samochodów mogą uniknąć kosztownych błędów w produkcji seryjnej oraz zoptymalizować procesy produkcyjne, co przekłada się na lepszą wydajność i niższe koszty produkcji.

Projektanci (osoby odpowiedzialne za rozwój poszyc na danym projekcie) często tworzą szablony dla nowych projektów, opierając się na dostarczonej przez klienta piance, na którą ubierane jest gotowe już poszycie. Aby dokładnie odwzorować końcowy produkt, konieczne jest użycie docelowej pianki. Niestety, wygląd poszycia może zależeć również od sposobu produkcji pianki, co sprawia, że wprowadzenie zmian do szablonów może niewiele wnieść w wygląd końcowy tapicerki. W takim przypadku uwagi są przekazywane do klienta, który zwykle konsultuje je ze swoim dostawcą.

Proces projektowania szablonów przez projektanta polega na przekładaniu kształtów z pianki bezpośrednio na materiał z tzw. fizeliny. Następnie ten kształt przenoszony jest na specjalny materiał z poliestru, czyli mylar. Przy przekładaniu kształtu na mylar projektant musi pamiętać, aby dodać około 8 mm do obwodu szablonu, co pozwoli na połączenie elementów szwem. Projektant może również dodać tzw. notch'e w miejscach montażu poszycia do pianki. Po przygotowaniu szablonów projektant może przystąpić do wykrawania elementów z materiału. Poszycie prototypowe powinno być wykonane z materiałów docelowych, jeśli jednak nie jest to możliwe, to należy użyć materiałów najbardziej zbliżonych specyfikacją do nich. Projektant dobiera również profile zapinające i podwieszki, aby montaż poszycia był możliwie prosty i powtarzalny. Wybór podwieszek zależy od budowy pianki i sposobu montażu poszycia. Profile zapinające poszycie do struktury dobierane są w zależności od dostępnych na stelażu miejsc montażowych. Następnie projektant montuje elementy na piankę i stelaż fotela samochodowego, a dopiero po zamontowaniu przeprowadza kontrolę jakości, aby upewnić się, że poszycie nie ma wgnieceń, pustych przestrzeni i za ciasnych miejsc, co nie byłoby pożądane z punktu widzenia jakości.

Na rysunkach (rys. 1 i rys. 2) przedstawiono finalne poszycie fotela samochodowego.



Rys. 1. Prawa strona poszycia samochodowego
Fig. 1. Right side of the car body



Rys. 2. Lewa strona poszycia samochodowego
Fig. 2. The left side of the car cover

Ważne jest, aby nie montować poszycia fotela samochodowego w przypadkowej kolejności, ponieważ dobre przygotowanie i określenie odpowiedniej kolejności montażu może wpłynąć na ostateczny wygląd poszycia. Montaż zaczyna się od przytwierdzenia części centralnej poszycia do pianki. Zamontowanie poszycia powinno być wykonywane w określonej kolejności, powinno się rozpoczynać od centralnych punktów montażowych pianki, a następnie przechodzić do punktów bocznych. Podobnie postępuje się z częścią oparcia fotela, zaczynając od centralnej części, a następnie przechodząc do górnych kanałów i bocznych. Ustalono taką kolejność w celu minimalizacji ryzyka popełnienia błędów i zwiększenia jakości poszycia.

Wczesniejsze planowanie kolejności montażu poszycia na piankę zapewnia powtarzalność procesu i eliminuje błędy wymagające ponownego montażu poszycia.

4. Naprężenie nici podczas szycia

Naprężenie nici odgrywa kluczową rolę w produkcji poszyć foteli samochodowych, ponieważ wpływa na ich jakość i wygląd. Szwy muszą być równomierne i trwałe, a poszycie foteli estetyczne, co wymaga odpowiedniego naprężenia nici.

Zbyt słabe naprężenie nici może prowadzić do niedoskonałości szwów, co wpłynie na trwałość i wygląd poszyć, natomiast zbyt mocne naprężenie może spowodować zaciągnięcia

tkanin i skóry oraz nierównomierną jakość szwów. Aby osiągnąć właściwe naprężenie nici, pracownicy muszą dostosować ustawienia maszyn szwalniczych do konkretnego materiału, szczególnie w przypadku tkanin i skóry o różnej grubości i różnych właściwościach. Muszą także regularnie sprawdzać naprężenie nici podczas szycia, aby zapewnić równomierne i trwałe szwy. Użycie wysokiej jakości nici, która jest trwała, odporna na ścieranie i zapewnia równomierne szycie, również ma kluczowe znaczenie. Produkcja poszyc foteli samochodowych wymaga precyzji i dbałości o szczegóły, a właściwe naprężenie nici jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na jakość końcowego produktu.

W jednostce inżynierskiej większość elementów jest wykrawana ręcznie przez projektanta, więc przy wykrawaniu elementów ważne jest, aby elementy zostały bardzo precyzyjnie wykrojone. W przeciwnym wypadku nieodpowiednie ustawienia maszyny i niedokładna technika szycia mogą prowadzić do niepożądanych efektów w postaci zmarszczek widocznych na poszyciu.

Do badania wykorzystano maszynę szyjącą i przyrząd do mierzenia naprężenia nici. Materiałem służącym badaniu jest winyl.

Badano trzy obszary poszycia, które zostały określone jako krytyczne pod względem występowania marszczeń materiału – trzy odcinki o długości: 463 mm, 409 mm i 258 mm.

Najlepsze wyniki zostały osiągnięte przy utrzymaniu naprężenia górnej nici w zakresie 500-550 cN i dolnej nici w zakresie 160-180 cN dla testowanych szwów. Jednakże, aby osiągnąć te wartości, ważne jest, aby zachować odpowiednie wymiary elementów i stosować właściwą technikę szycia. Poprawna technika szycia oznacza, że zszywane elementy nie są naciągane, zachowane są odpowiednie odległości pomiędzy szwami, a zakończenia szwu są poprawne.

Należy także wziąć pod uwagę fakt, że wykorzystywane materiały często różnią się od siebie wytrzymałością na rozciąganie, natomiast osiągnięty podczas badań wynik jest optymalny dla materiałów winylowych oraz skórzanych.

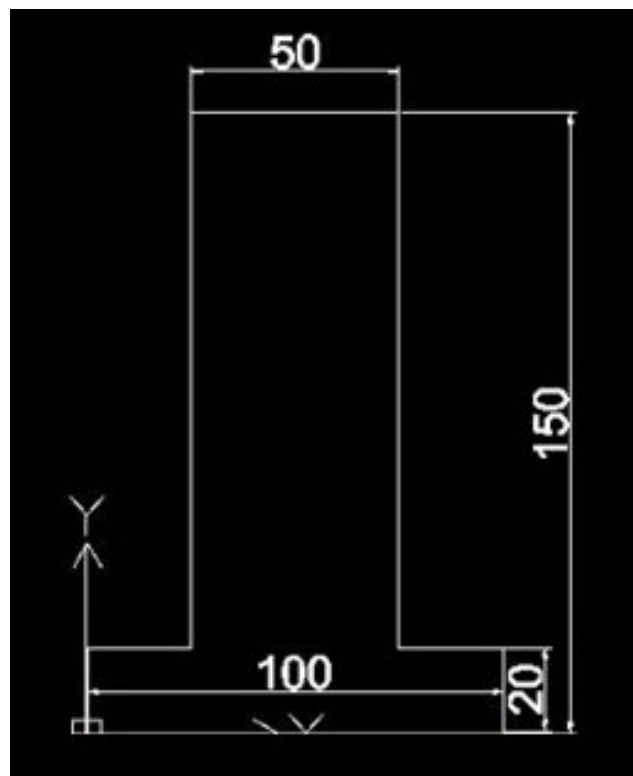
W wyniku badań zauważono, że zastosowanie odpowiednich zakresów wartości naprężenia nici i dokładne wykrojenie elementów pozwoliło na uzyskanie zadowalającego efektu. Jednak ze względu na specyfikę badania oraz wykorzystane narzędzia wyniki nie są reprezentatywne dla innych projektów ani nie powinny stanowić podstawy do produkcji seryjnej. Badanie to zostało przeprowadzone wyłącznie ze względu na pojawiające się problemy jednostki inżynierskiej, które wystąpiły podczas konkretnego projektu.

5. Problem dziurki po igle

W produkcji poszyc foteli samochodowych widoczne otwory po igle są częstym elementem, wynikającym z procesu szycia przez maszyny szwalnicze różnych materiałów, w tym tkanin, skóry i materiałów syntetycznych. Dziurki po igle są zauważalne na materiale,

ponieważ igła przeszycia materiał, tworząc otwory, przez które przechodzi nić. Dla skóry dziurki po igle są bardziej widoczne, ponieważ jest ona grubsza i bardziej sztywna. Niemniej jednak dziurki te są naturalną konsekwencją procesu szycia i nie mają wpływu na jakość końcowego produktu, o ile są zgodne z normami jakościowymi. W rzeczywistości dzięki dziurkom po igle szwy są bardziej wytrzymałe, ponieważ nić ma lepsze oparcie i mocniej trzyma się w materiale. Producentom poszyć foteli samochodowych zależy na zminimalizowaniu widoczności dziurek po igle przez zastosowanie specjalnych technik szycia oraz materiałów, które tworzą mniej widoczne otwory. Jednak w przypadku skóry widoczne otwory są nieuniknione.

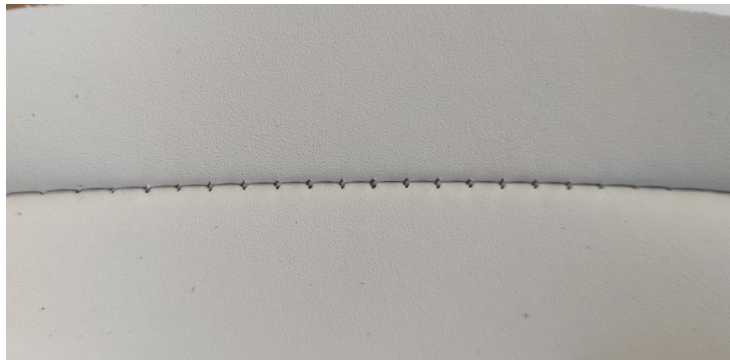
W celu rozpoznania problemu widoczności otworów po igle przeprowadzono badanie. Czternaście próbek materiałów, składających się z dwóch zszytych ze sobą elementów, zostało poddanych badaniu. Do analizy defektów występujących przy szyciu materiałów winylowych dobrano próbki w dwóch różnych kolorach. Każda próbka została wykrojona z materiału w ściśle określonym kształcie (rys. 3). Następnie próbki zostały zawieszono na specjalnej bramie (rys. 4) i przymocowane chwytakami. Na końcach próbek zostały umieszczone haki, na których umieszczono obciążenia o sile 20 N, aby ocenić efekt, jaki powoduje użycie różnych igieł w procesie szycia. Celem badania było określenie, która igła zapewni najlepszy efekt szycia, umożliwiając jednocześnie zachowanie akceptowalnego wyglądu szwów oraz minimalizowanie widoczności otworów po igle.



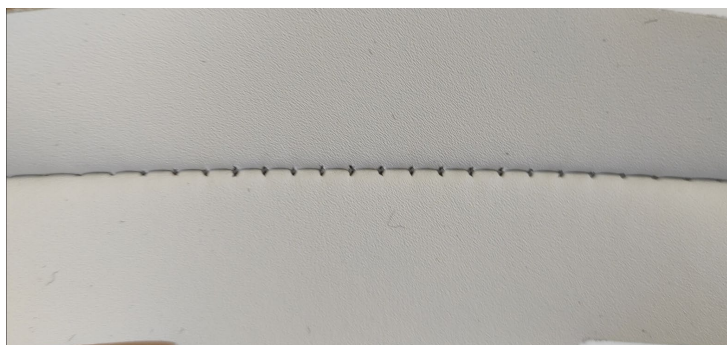
Rys. 3. Wymiary elementu poddanego próbie
Fig. 3. Dimensions of the tested item



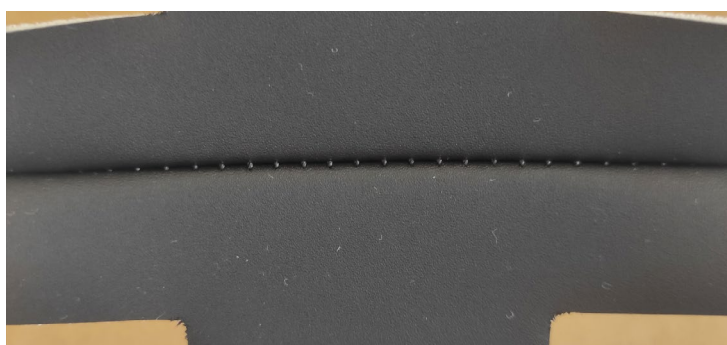
Rys. 4. Stanowisko przeprowadzania prób
Fig. 4. Test stand



Rys. 5. Jedna z próbek, biały winyl
Fig. 5. One of the samples, white vinyl



Rys. 6. Jedna z próbek, biały winyl
Fig. 6. One of the samples, white vinyl



Rys. 6. Jedna z próbek, biały winyl
Fig. 6. One of the samples, white vinyl

Tabela 1

Zestawienie użytych do badania igieł

Numer próbki	Rodzaj igły
1	120SD
2	120SD
3	110SD
4	110SD
5	110RG SAN5
6	110RG SAN5
7	130RG SAN5
8	130RG SAN5
9	130 SERV 7
10	130 SERV 7
11	110R
12	110R
13	110PCL
14	110PCL

Źródło: opracowanie własne.

Po wykonaniu testów i dokładnej wizualnej oceny wyników, a także po konsultacjach z zakładami szwalniczymi stwierdzono, że najlepszy wygląd szwu na białym winylu uzyskano przy użyciu igły o numerze 110SD (rysunek 5). Dla próbek wykonanych z czarnego winylu nie zauważono żadnych zmian w wyglądzie szwu. Igła 110SD cechuje się lekkim zaokrągleniem

i ostrym, trójkątnym wycięciem na czubku. Bardzo ważne jest, aby igła po przesytych materiale, szczególnie w twardych materiałach, takich jak skóra czy winyl, pozostawiała jak najmniejszy ślad. Dzięki przeprowadzonym testom uzyskano satysfakcjonujący efekt, wybrana igła została zaakceptowana do procesu produkcji.

6. Podsumowanie

Dalsze badania prowadzone przez jednostkę inżynierską mają na celu znalezienie najlepszej igły do szycia, która pozwoli na uzyskanie jeszcze lepszych wyników. Jednym z kluczowych aspektów w tym procesie jest minimalizacja widocznych pól wbicia igły, szczególnie w twardych materiałach, takich jak skóra czy winyl.

Nieustanne doskonalenie procesu produkcyjnego ma istotne znaczenie, szczególnie w branży motoryzacyjnej, gdzie konkurencja jest wyjątkowo silna. Każdy dostawca chce zaoferować swoim klientom najwyższą jakość produktów, co jest niezbędne dla zbudowania ich zaufania i lojalności. Dlatego też jednostka inżynierska będzie dalej pracować nad doskonaleniem procesu produkcyjnego, na podstawie nowych technologii i innowacji. Dzięki podejmowanym działaniom, takim jak przeprowadzanie badań i wprowadzanie ulepszeń, są możliwe ciągłe doskonalenie procesów produkcyjnych i poprawa jakości końcowych produktów. Wszelkie badania i ulepszenia są przeprowadzane metodą prób i błędów, a każdy taki krok pozwala na wprowadzenie kolejnych usprawnień. W efekcie branża motoryzacyjna rozwija się w kierunku coraz lepszych i bardziej zaawansowanych rozwiązań, co przekłada się na coraz większe zadowolenie klientów z końcowych produktów.

Jednocześnie, dzięki wprowadzeniu wyników badań do procesu produkcyjnego, udało się osiągnąć poprawę jakości poszycia foteli samochodowych, co wpłynęło na zwiększenie zadowolenia klientów i poprawę wizerunku firmy. Każde przedsiębiorstwo stawia na rozwój oraz umacnianie swojej pozycji na rynku pracy, tak więc praca nad doskonaleniem procesu produkcyjnego nigdy się nie kończy, a cały czas powstają nowe rozwiązania oraz technologie, które ułatwiają przedsiębiorstwom wprowadzenie jeszcze lepszych produktów.

Bibliografia

1. Klimiuk J. Rola kierownika projektu oraz zespołu projektowego w zarządzaniu projektami. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 2009, 35-45.
2. Gendarz P., Salamon S., Chwastyk P. „Projektowanie inżynierskie i grafika inżynierska”. Wydawnictwo Ekonomiczne S.A., Warszawa 2014.
3. Asanowicz A. „Geneza metodologii projektowania”. Politechnika Białostocka, Białystok 2010.

4. Wolniak R., Skotnicka-Zasadzień B. „Zarządzanie jakością dla inżynierów”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
5. Gajdzik B., Wyciślik A. „Jakość, środowisko i bezpieczeństwo pracy w zarządzaniu przedsiębiorstwem”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
6. Bielawa A. „Postrzeganie i rozumienie jakości – przegląd definicji jakości”. Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania, nr 21.
7. Czerska J. „Podstawowe narzędzia Lean Manufacturing”. LeanQ Team, Gdańsk 2014.
8. Banaszekiewicz K., Gnatowski A., Kubiak J., Leśniak K., Wojtaszek-Kwaśniak A. „Wpływ wykorzystania materiałów i technologii na właściwości mechaniczne prototypów poszycia foteli samochodowych”, Journal of Engineering and Technology, Vol. 8, No. 2, pp. 125-135. 2018.
9. Schmeisser J., Miedzinski A., Nowakowski T. "An analysis of the effect of design and material parameters on the properties of automotive seat covers made by rapid prototyping", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 4, 2016.
10. Dong G., Hong W. (2019). Study on the Influence of Sewing Thread Tension on Seam Quality. Journal of Textile Research.
11. Nowicki M., „Technologie szycia w przemyśle samochodowym”, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, 2017.
12. Wojtkowski P. „Widoczne dziurki po igle – co warto wiedzieć o procesie szycia poszyć foteli samochodowych”, Auto Świat, 2020.

PROCES WYTWARZANIA POSZYCIA FOTELE SAMOCHODOWEGO, DOBÓR I OCENA PARAMETRÓW WPŁYWAJĄCYCH NA JAKOŚĆ POSZYCIA

Streszczenie

Artykuł omawia proces produkcji prototypowego poszycia fotela samochodowego oraz problem występujących zmarszczek materiału. Przeprowadzona analiza parametrów wpływających na jakość poszycia pozwoliła wyeliminować ten problem. Zbadano naprężenie nici podczas szycia i określono zakres wartości dla dolnej i górnej nici na podstawie wyników prób, co pozwoliło uzyskać pożądany efekt. Ważnym czynnikiem wpływającym na jakość poszycia jest również technika szycia, która zależy w dużej mierze od doświadczenia operatora maszyny. Dobór odpowiedniej igły do badanego materiału wymagał przeprowadzenia testu na czternastu próbkach przy użyciu różnych rodzajów igieł. Typ igły został wyznaczony na podstawie oceny wizualnej badanych próbek.

Słowa kluczowe: projektowanie, jakość, proces wytwarzania

MANUFACTURING PROCES OF THE CAR SEAT COVER, SELECTION AND EVALUATION OF PARAMETERS AFFECTING THE QUALITY OF THE CAR SEAT COVER

Abstract

The article discusses the production process of a prototype car seat cover and the problem of the occurring wrinkles of the material. An analysis of parameters affecting the quality of the cover was carried out to eliminate this problem. The tension of the threads during sewing was studied and the range of values for the lower and upper threads was determined based on the results of the tests, which made it possible to achieve the desired effect. An important factor affecting the quality of the plating is also the sewing technique, which depends largely on the experience of the machine operator. Selecting the right needle for the material under test required a test on fourteen samples using different types of needles. The type of needle was determined by visual evaluation of the test samples.

Keywords: design, quality, manufacturing proces

Wioleta RAKOWSKA¹, Aleksander GWIAZDA²

POMIAR POTENCJAŁU KOMERCJALIZACJI PROJEKTÓW ROZWOJOWYCH NA PRZYKŁADZIE ŁUKASIEWICZ – GIT

1. Wprowadzenie

XXI w. to okres dynamicznie zmieniających się produktów i usług. Głównym czynnikiem wpływającym na dynamikę zmian jest zwiększenie konkurencyjności, która znacząco wpływa na rozwój nowej oferty przedsiębiorstw. Czynnikiem, który pozwala nadążyć za tempem zmian, jest innowacyjność. Coraz częściej odgrywa ona bardzo ważną rolę w strategiach przedsiębiorstw [7]. Obecnie przez innowacje uzyskuje się przewagę konkurencyjną, wysoką efektywność, odnowę portfela produktów oraz długowieczność organizacji [1]. Jednym z głównych zadań państw członkowskich Unii Europejskiej jest transfer technologii z publicznych ośrodków naukowych do gospodarki.

Połączenie badań naukowych z praktyką biznesu w postaci aktywizacji potencjału jednostek naukowo-badawczych, przedsiębiorstw, jednostek strefy publicznej oraz organizacji pozarządowych przez przekazywanie wyników badań, a także oferowanie własnych osiągnięć w celu uruchomienia działań gospodarczych pozwala przedsiębiorstwom na przyspieszenie procesu kreowania i wdrażania innowacji. Jednakże niezbędnym elementem całego wskazanego procesu jest skuteczna komercjalizacja opracowywanych innowacji. Komercjalizacja, jako swoisty proces działania, nie ma jednoznacznej definicji. Słowo to wywodzi się od łacińskich wyrazów *commercialis* – handlowy, *commercium* – handel towarami [4]. Oxford w swoim słowniku definiuje komercjalizację jako używanie czegoś w celu osiągnięcia zysku, zwłaszcza w sposób, którego inni ludzie nie akceptują [<https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/...>].

W istocie komercjalizacja jest rozwijana przez spełnianie oczekiwań firm i zapewnienie przewagi konkurencyjnej na rynku [6]. O ile innowacja przynosi korzyści klientom wynikające z nowej metody, pomysłu, produktu lub procedury, o tyle komercjalizacja pozwala przynieść dochód właścicielowi innowacji. Aby komercjalizacja była skuteczna, rozwiązanie musi wpisać się w potrzebę wywołaną przez rynek [5]. Komercjalizacja ma również tendencje

¹ Wioleta.rakowska@polsl.pl, Wydział Mechaniczny Techniczny, Politechnika Śląska, <http://strona.polsl.pl/>

² aleksander.gwiazda@polsl.pl Wydział Mechaniczny Techniczny, Politechnika Śląska, <http://strona.polsl.pl/>

do zobowiązania badaczy oraz jednostki badawczej do zachowania dyscypliny rynkowej. Przy tworzeniu wyników badań należy również poświęcić dużą uwagę badaniu warunków rynku, identyfikując potencjalne zastosowania innowacji oraz klienta nią zainteresowanego [3]. Częsty kontakt z odbiorcą rozwiązania przez komercjalizację ukazuje potrzeby techniczne i daje początek nowym projektom z dużym potencjałem do zbadania. Rezultatem takiego procesu będą priorytety badawcze nastawione na popyt.

2. Struktura organizacyjna Łukasiewicz – GIT i miejsce w niej działu komercjalizacji

Struktura organizacyjna to system określający działania, których celem jest osiągnięcie maksymalnych efektów organizacji. Określa ona, w jaki sposób praca przepływa przez organizację oraz umożliwia współpracę grupom w zakresie ich funkcji w celu zarządzania zadaniami. Posiadanie struktury organizacyjnej pozwala firmom zachować efektywność i koncentrację.

Sieć Badawcza Łukasiewicz powstała na mocy ustawy o Sieci Badawczej Łukasiewicz z 2019 roku. Ustawa ta określa 3 główne zadania instytutów sieci, którymi są: realizacja projektów badawczych w ramach współpracy podmiotów tworzących Sieć, komercjalizacja, oraz współpraca międzynarodowa w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych oraz komercjalizacji. W 2021 roku Centrum Łukasiewicz opracowało regulamin zarządzania prawami autorskimi i prawami pokrewnymi oraz prawami własności przemysłowej wraz z zasadami komercjalizacji dla Sieci Badawczej Łukasiewicz. W styczniu 2023 roku doszło do połączenia 3 instytutów Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza, Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL oraz Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa, w efekcie którego powstał Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny (GIT). Prace związane z połączeniem instytutów wykazały, że dwa z trzech łączących się instytutów kontynuowało komercjalizację według zasad sprzed powołania Sieci Badawczej Łukasiewicz. Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa był jedyną jednostką, która powołała komórkę organizacyjną odpowiedzialną za komercjalizację (rys. 1).

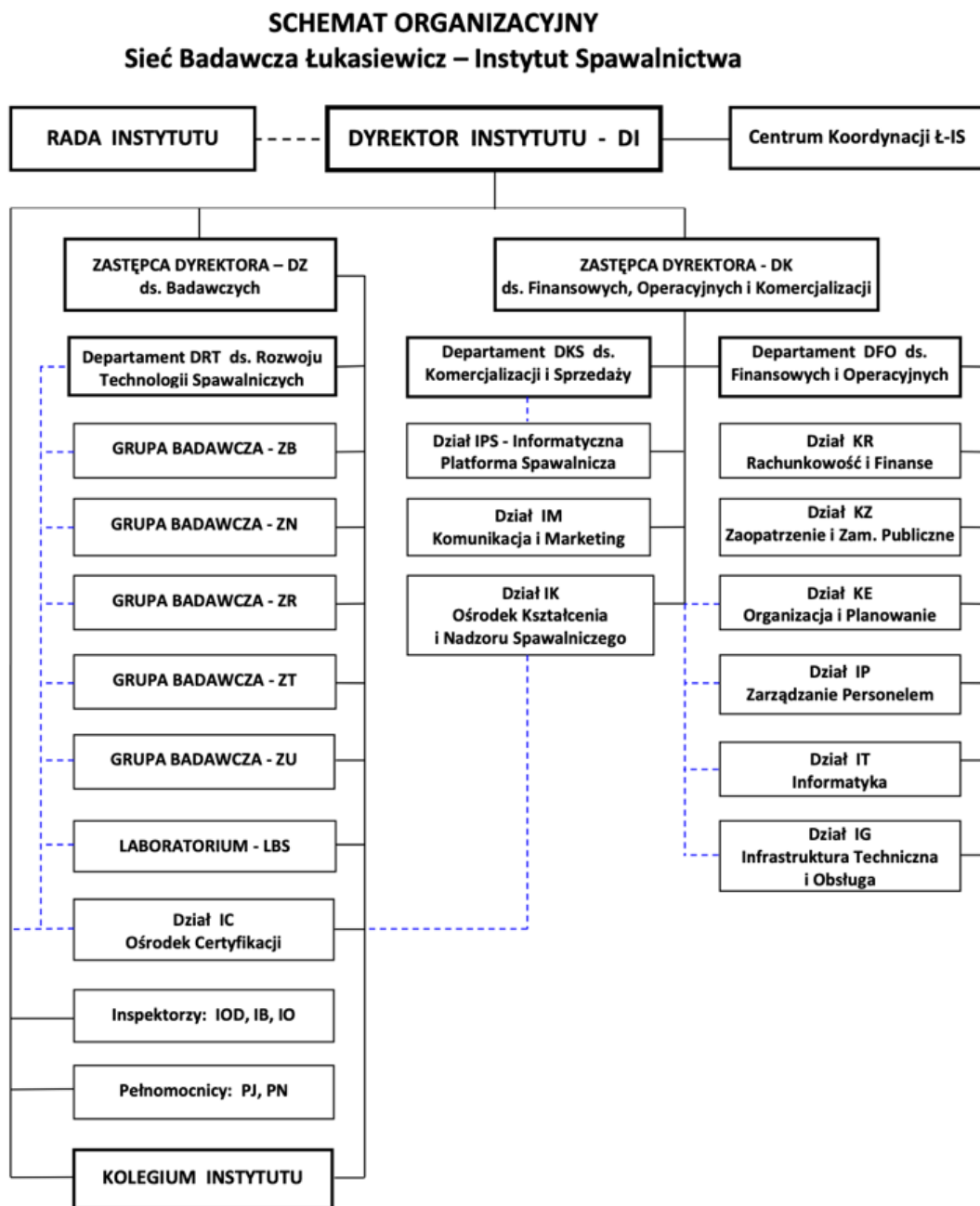
Celem połączenia było zwiększenie kompetencji, wiedzy i doświadczenia pracowników Łukasiewicz – GIT. Struktura organizacyjna Łukasiewicz – GIT została podzielona według funkcji na (rys. 2):

- back office, wspomagający podstawową działalność lub procesy pomocnicze, np. dział finansów, HR, organizacji oraz kontrolingu;
- core business, stanowiąca główną część działalności, m.in. badawczo-rozwojowa, naukowa, wdrożeniowa, wsparcie badań;
- front office – to budowanie relacji pomiędzy klientem a firmą przez takie działy jak np. sprzedaż, komercjalizacja.

Ponadto zdefiniowano następujące poziomy zależności związane z innymi zakresami odpowiedzialności organizacyjnej:

Poziom 1

Centrum Badań i Rozwoju – wyodrębniona obszarowo komórka organizacyjna, odpowiedzialna za prowadzenie działalności naukowej oraz badawczo-rozwojowej określonej dyscyplinie nauki lub spójnej grupie dyscyplin. Departament to wyodrębniona obszarowo komórka organizacyjna odpowiedzialna za administracyjną, organizacyjną, techniczną, operacyjną, etc. obsługę działalności instytutu Łukasiewicza.



Rys. 1. Schemat organizacyjny Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa

Fig. 1. Organizational diagram of the Łukasiewicz Research Network – Institute of Welding

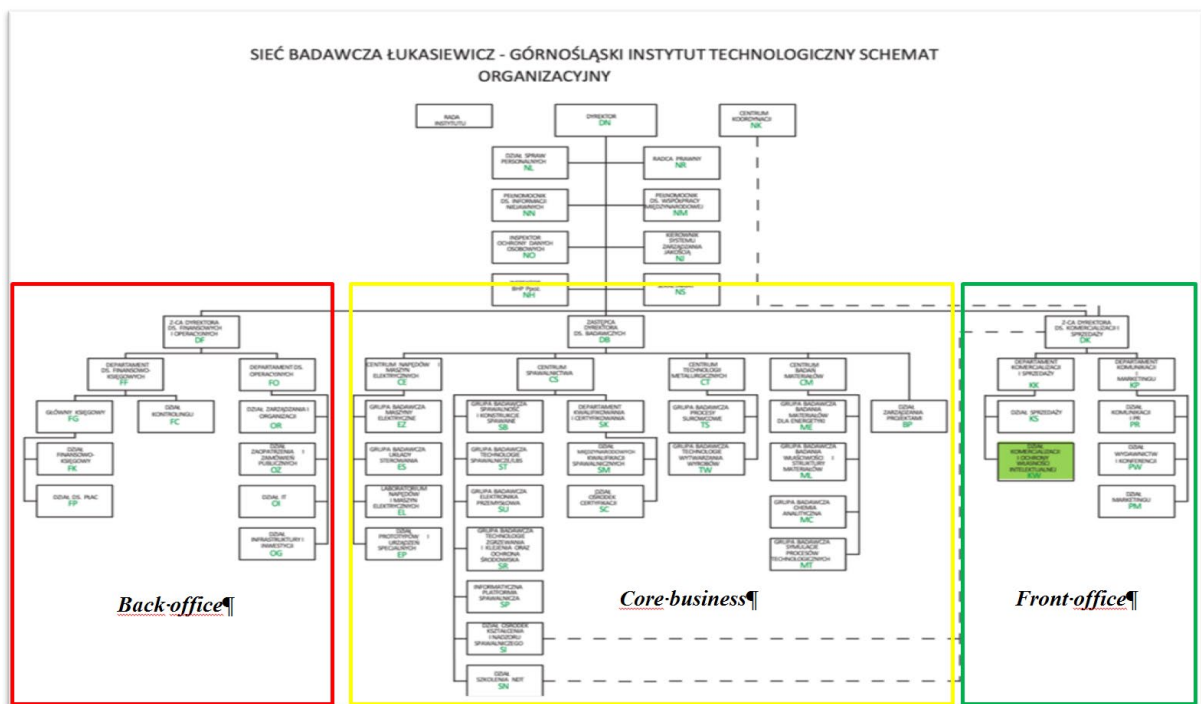
Źródło: <http://bip.instytytspawalnictwa.pl/sites/...>

Poziom 2

Grupa badawcza to komórka organizacyjna w centrum badań i rozwoju z określoną nazwą i zakresem działania, grupująca kadrę naukową. Laboratorium to komórka organizacyjna w centrum badań i rozwoju z określoną nazwą i zakresem działania, której podstawowym zakresem działalności jest prowadzenie badań pomocniczych na rzecz grup badawczych. Dział to komórka organizacyjna działająca w ramach departamentu lub realizująca zadania specyficznie określone dla departamentu. Dział zarządzany jest przez kierownika działu.

Poziom 3

Sekcje wchodzi w skład działu, laboratorium lub grupy badawczej i realizują jednorodną część zadań komórki organizacyjnej, w skład której wchodzi. Sekcja może być zarządzana przez kierownika sekcji. Samodzielne stanowisko pracy to jednoosobowe, specjalistyczne stanowisko pracy określonego rodzaju, podlegające bezpośrednio dyrektorowi lub zastępcy dyrektora.



Rys. 2. Schemat organizacyjny Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny
Fig. 2. Organizational diagram Łukasiewicz Research Network – Upper Silesian Institute of Technology

Źródło: opracowanie własne

Dział komercjalizacji i Ochrony Własności Intelektualnej (KW) jest w Departamencie Komercjalizacji i Sprzedaży, zarządzanym przez zastępcę dyrektora ds. komercjalizacji i sprzedaży (rys. 2). Do głównych zadań Działu KW należy identyfikacja projektów mających potencjał komercjalizacyjny, przygotowywanie analiz, dokumentów i raportów z zakresu komercjalizacji i ochrony własności intelektualnej oraz udział w spotkaniach i nadzór nad

dokumentacją formalną w procesach końcowych etapów prowadzonych prac badawczo-rozwojowych, prowadzenie prac związanych z pozyskaniem ochrony dla wynalazków, wzorów użytkowych, znaków towarowych, wzorów przemysłowych itp.

3. Czynniki podlegające analizie w ramach oceny potencjału komercyjnego realizowanych prac

Dział komercjalizacji opracował kartę oceny potencjału. Wypełnionej karcie przyznaje się ocenę od 0 do 5. Wskaźniki umieszczone są w formularzu Excel pozwalającym na ocenę potencjału wdrożeniowego danego rozwiązania w dziewięciu kategoriach. Badane czynniki to: atrakcyjność rynkowa, gotowość rynku, możliwości rozwoju produktu, możliwości wytwórcze (techniczne), możliwości biznesowe, możliwości finansowe, ochrona własności intelektualnej, konkurencja, aktualność technologii. Przytoczone definicje zostały wypracowane i zastosowane w Łukasiewicz – Instytucie Spawalnictwa.

Atrakcyjność rynkowa – stopień, w jakim rynek oferuje organizacji możliwości sprzedaży, biorąc pod uwagę wielkość rynku i tempo wzrostu oraz poziom konkurencji i inne ograniczenia.

Gotowość rynkowa (poziom TRL [ang. *Technology Readiness Level*]) – wskazuje na stopień gotowości produktu lub usługi do wprowadzenia na rynek jako oferty dla grupy klientów. Skala stosowana w Instytucie jest zbieżna ze skalą stosowaną przez NCBR, która została podzielona na dziewięć poziomów.

Możliwości techniczne – to, co firma jest w stanie wyprodukować, wraz z dokumentami i standardowymi procedurami, które można zastosować w produkcji.

Możliwości rozwoju produktu – możliwość podjęcia kroków, które obejmują konceptualizację, projektowanie, rozwój i marketing nowo utworzonych lub udoskonalonych towarów lub usług.

Możliwości finansowe – źródła finansowania z uwzględnieniem udziału środków własnych jednostki.

Możliwości biznesowe – szansa na wykorzystanie sytuacji/wydarzenia na rynku w celu uzyskania korzyści biznesowych.

Ochrona własności intelektualnej (stopień ochrony) – uzależniona jest od statusu praw własności i sposobu ochrony. Może mieć charakter formalny, np. patent, wzór użytkowy, lub nieformalny, tj. utrzymanie wyników w tajemnicy (know-how).

Aktualność technologii – wykorzystanie nowych pomysłów lub wiedzy przy tworzeniu nowych technologii lub usług.

Konkurencja – wskazuje na wielkość i siłę rynków odpowiadających zaproponowanemu rozwiązaniu.

Wyniki opracowane przez zespół specjalistów zaprezentowano w tabelicy 1 oraz w formie wykresów słupkowych.

Tablica 1

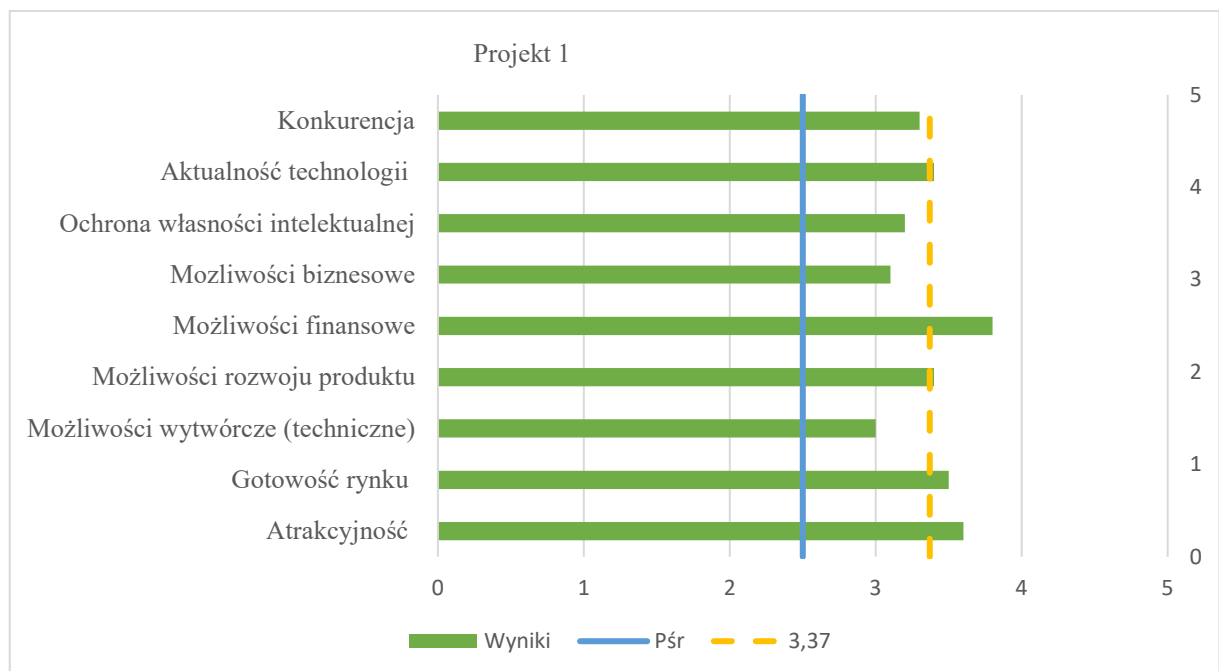
Skala oceny potencjału

Wartość	Ocena
5	zdecydowany sukces
4	bardzo prawdopodobny sukces
3	prawdopodobny sukces
2	wątpliwy sukces
1	komercja lub publikacja
0	brak danych

Źródło: opracowanie własne

Wykresy słupkowe to graficzna możliwość prezentacji danych, są pomocne podczas podsumowania zmiennych kategorii. Każdy wykres zbudowany jest z dziewięciu kategorii, które są ze sobą połączone ze względu na zarządzani projektami badawczymi. Na wykresie słupkowym można zidentyfikować mocne i słabe strony analizowanego przedsięwzięcia komercjalizacyjnego.

Na podstawie przedziałów ocen, zdefiniowanych w zależności od średniej i minimalnej wartości punktów uzyskanych przez dane rozwiązanie w wymienionych kategoriach, możliwe jest wskazanie stopnia prawdopodobieństwa sukcesu wdrożeniowego danego rozwiązania.



Rys. 3. Przykładowa ocena potencjału komercjalizacyjnego „Projekt 1”

Fig. 3. An example of an assessment of the commercialization potential of "Project 1"

Źródło: opracowanie własne

Projekt 1 otrzymał średnią ocen 3,37. Projekt dotyczył wprowadzenia hybrydowej techniki wykonywania połączeń spawanych. Zatem opierał się na innowacyjnym połączeniu ze sobą dwóch standardowych technik spawania. Rozwiązanie to pozwoliło wyeliminować problem wad związanych ze złym pozycjonowaniem elementów, lecz niestety nie nadawało się w przypadku produkcji jednostkowej, a ta jest zdecydowanie częstsza w przypadku rozpatrywanej klasy elementów. Bardziej szczegółowe charakterystyki tego projektu są tajemnicą handlową Instytutu.

Ocena potencjału Projektu 1 wykazała, że słabymi stronami rozwiązania są: możliwości wytwórcze oraz możliwości biznesowe. Silną stroną rozwiązania są możliwości finansowe, gotowość rynku na przyjęcie innowacyjnego rozwiązania, które zostało ocenione jako atrakcyjne i wpisujące się w aktualne trendy rynkowe. Za pomocą opracowanych narzędzi w Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa przeprowadzono ocenę potencjału wdrożeniowego wyników badań lub prac zgłoszonych w Instytucie do ochrony prawnej rozwiązań opracowanych w 2021 r. Ocena została sporządzona przez pracowników komórki ds. komercjalizacji. Osoby przypisujące ocenę specjalizowały się w zarządzaniu i marketingu. Średnia ocena potencjału wyniosła 3,07, co zgodnie z skalą ocen potencjału oznaczało prawdopodobny sukces rozwiązania. Współpraca ze jednym z Instytutów Łukasiewicza wykazała, że przypisane oceny są zbyt optymistyczne i należy ponownie dokonać oceny poszczególnych czynników wpływających na ocenę.

4. Ocena poziomu komercjalizacji wybranych prac rozwojowych realizowanych w GIT

W związku z powyższym komórka ds. komercjalizacji opracowała wstępną ocenę potencjału komercjalizacyjnego, która każdorazowo przeprowadzana jest przez komisję odbiorów prac badawczych. Formularz składa się z dziewięciu kategorii i ma formę ankiety jednokrotnego wyboru ze skalą od 0 do 5. Formularz jest wypełniany przez komisję odbioru etapu prac podczas odbioru częściowego oraz końcowego. W skład komisji wchodzi: profesor z dziedziny pracy badawczej, kierownik grupy badawczej, dyrektor ds. badawczo-rozwojowych, specjalista ds. komercjalizacji, kierownik zarządzania i organizacji oraz kierownik marketingu. Zgromadzone wyniki prezentowane są również w formie wykresu radarowego i przesyłane do kierowników prac badawczych oraz kierowników komórek organizacyjnych w celu wskazania obszarów, które warto dopracować, ponieważ w ocenie komisji nie zostały poruszone lub są słabe.

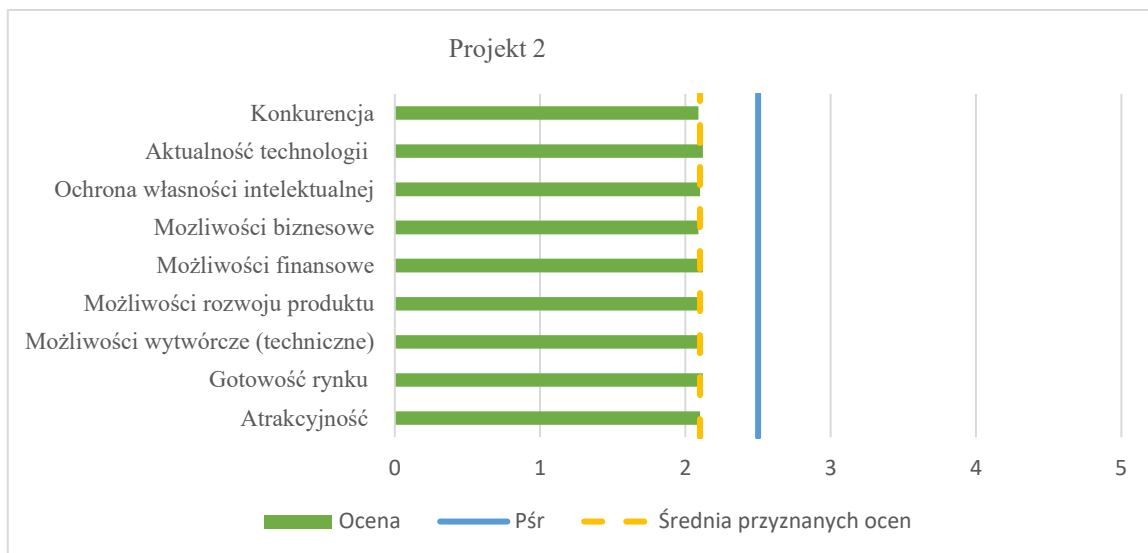
Poniżej przedstawiono wyniki oceny komisji odbioru (rys. 4 i 5). Jednak ze względu na ochronę tajemnicy przedsiębiorstwa i zwalczanie nieuczciwej konkurencji oraz kontynuowanie prac badawczych nad prowadzonymi projektami Instytut nie wyraził zgody na publikowanie

zakresu prac badawczych prowadzonych w ramach ocenianych projektów. Autorzy uzyskali jedynie zgodę na zaprezentowanie wyników procedury oceny ich zdolności do komercjalizacji.

Średnia ocen Projektu 2 to 1,7, tym samym ocena przeprowadzonych badań określa, że komercjalizacja wyników badań jest bardzo mało prawdopodobna.

Projekt dotyczył wprowadzenia usprawnienia technologii spawania łukiem ukrytym stali ulepszonej cieplnie. Zatem celem tego projektu było opracowanie technologii spawania materiałów twardych o niższej spawalności. Podczas badań dokonano próby opracowania technologicznego spawania złączy doczołowych różnymi metodami. Wyniki tego projektu nie były jednoznaczne, gdyż parametry jakościowe około 30% połączeń spawanych były poniżej standardów. Projekt ten (2) był związany z materiałami produkcyjnymi, które ze względu na wojnę ukraińsko-rosyjską stały się trudno dostępne. Badania zostały przerwane ze względu na brak możliwości pozyskania materiału do badań.

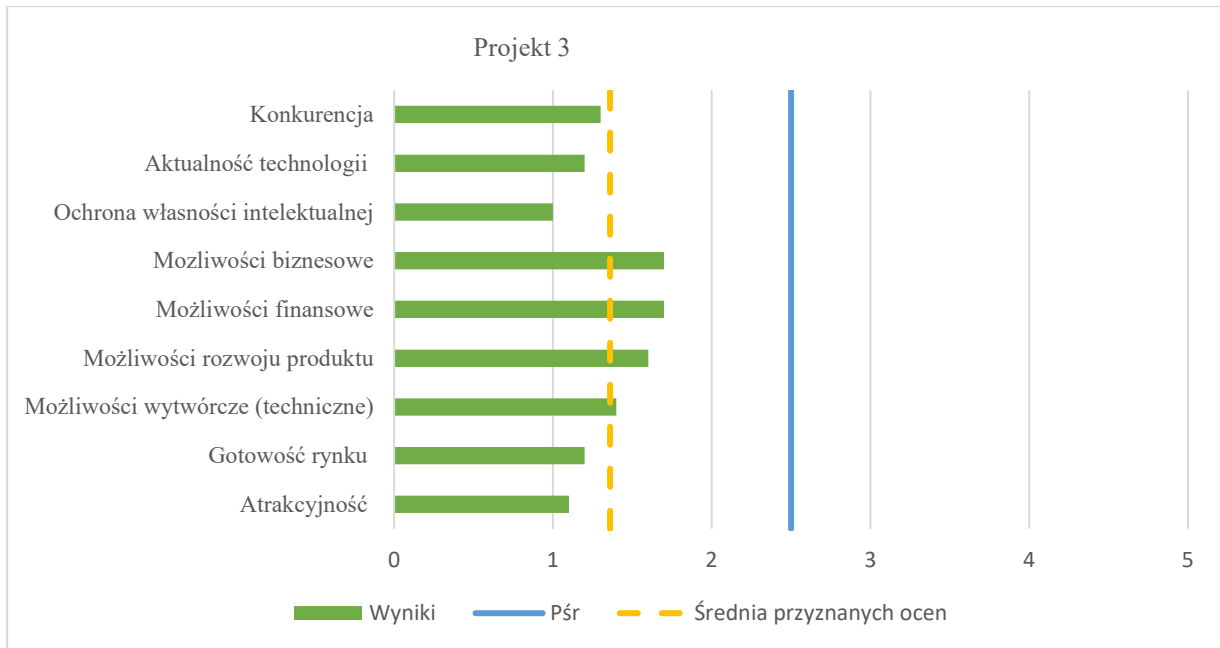
Projekt 3 otrzymał średnią ocen 1,36. Oznacza to, że możliwa jest publikacja lub komercja rozwiązania. Istnieją podobne rozwiązania na rynku, które wykorzystują bardziej współczesne technologie w opracowanym rozwiązaniu, przez co konkurencyjność projektu jest bardzo mała.



Rys. 4. Przykładowa ocena potencjału komercjalizacyjnego „Projekt 2”

Fig. 4. An example of an assessment of the commercialization potential of "Project 2"

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Przykładowa ocena potencjału komercjalizacyjnego „Projekt 3”

Fig. 5. An example of an assessment of the commercialization possibilities of "Projekt 3"

Źródło: opracowanie własne

Projekt 3 dotyczył opracowania technologii spawania wiązką elektronów oraz odprężania wibracyjnego elementów obudowy silnika elektrycznego ze stopów aluminium. Ze względu na dużą płynność jeziora spawalniczego spawanie aluminium wymaga bardziej specjalnego podejścia. Jednakże potrzebą, na podstawie której powstał ten projekt, było opracowanie przez kontrahenta nowego silnika elektrycznego przeznaczonego dla przemysłu motoryzacyjnego. Problem spawania wiązką elektronów wiąże się z tym, że trudno jest osłonić miejsce spawania przed dostępem tlenu. Tym samym aplikacja opracowanego rozwiązania wymaga poniesienia dodatkowych kosztów. W ramach pracy uzyskano złącza spawane przy użyciu wiązki elektronów, spełniające stawiane im wymagania. Dodatkowo opracowano modele numeryczne złączy spawanych, które mogą ułatwić proces projektowania elementów obudów silników elektrycznych.

Oceniający po wywiadzie z kierownikiem projektu ocenili to rozwiązanie jako rozwiązanie o niskim potencjale biznesowym oraz rozwoju.

5. Podsumowanie

Od 2022 roku przeprowadzono 30 ocen rozwiązań opracowanych przez pracowników Łukasiewicz – GIT. Uzyskane rezultaty wskazują, że wyniki badań osiągają maksymalnie gotowość rynkową na poziomie TRL4, badania nadal prowadzone są w środowiskach laboratoryjnych i wymagają dalszych prac rozwojowych.

Jednocześnie uzyskane oceny wskazały potrzebę prowadzenia badań potrzeb rynkowych na większą skalę, które wskażą istniejące obszary umożliwiające nawiązanie współpracy z przemysłem lub konieczność stworzenia nowych. Bardzo istotną rolę w Łukasiewicz – GIT będzie odgrywał Dział Sprzedaży, który – jako newralgiczna część struktury organizacyjnej – jako pierwsza ma bezpośredni kontakt z rynkiem. Dzięki analizie pozyskanych z rynku informacji naukowcy są w stanie odpowiedzieć na potrzeby wynikające z rynku.

Kolejnym aspektem, który należy udoskonalić, jest zdolność nieustannego wskazywania i odkrywania możliwości badawczych, ciągłego udoskonalania. Należy opracować i udoskonalić procesy wewnętrzne Instytutu oraz zwiększyć świadomość biznesową twórców.

Biorąc pod uwagę zebrane doświadczenia oraz wnioski z dotychczas przeanalizowanych przypadków, wskazano na pewne rozwiązania systemowe, które mogą przyczynić się do poprawy sytuacji w zakresie komercjalizacji rozwiązań. Rekomenduje się stosowanie procesu zgłaszania propozycji prac badawczych uwzględniającego dane niezbędne do prawidłowej komercjalizacji rozwiązań. W tym zakresie opracowywana jest odpowiednia procedura i przygotowany jest wzór formularza zgłoszeń. Wdrożenie procedury pozwoli na powtarzalność i ciągłość działań w zakresie komercjalizacji własnych opracowań. Zgłoszona propozycja powinna podlegać ocenie przez komórkę ds. komercjalizacji pod względem biznesowym (zgodnie z zapisami procedury, by oceny były ze sobą porównywalne). Celem tej oceny jest wskazanie potencjału komercjalizacji na wstępnym etapie projektu, tak by celowo wspomagać w najbardziej znaczący sposób te o najwyższej ocenie potencjału. Zastosowanie takiego procesu umożliwi budowanie długofalowej strategii komercjalizacji projektów Instytutu.

Bibliografia

1. Dyduch W. (2015). Innowacyjność strategiczna przedsiębiorstw XXI w. *Studia Ekonomiczne*, (222), 19–33.
2. Kalinowski T.B. (2010). *Innowacyjność przedsiębiorstw a systemy zarządzania jakością*. Wolters Kluwer.
3. Kalaltzandonakes N.G. (1997). *Commercialization of research and technology*. University of Missouri.
4. Kopaliński W. (2002). *Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych*. Świat Książki.
5. Rafinejad D. (2007). *Innovation, Product Development and Commercialization: Case Studies and Key Practices for Market Leadership*. J. Ross Pub.
6. Szycher M. (2016) *Commercialization secrets for scientist and engineers*. CRC Press
7. Trzmielak D.M. (2013). *Komercjalizacja wiedzy i technologii – determinanty i strategie*. Uniwersytet Łódzki.

Strony internetowe:

1. [https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/\[...\]](https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/[...]).
2. http://bip.institutspawalnictwa.pl/sites/default/files/strona/zalaczniki/schemat_organizacyjny_04_05_2021_0.pdf

POMIAR POTENCJAŁU KOMERCJALIZACJI PROJEKTÓW ROZWOJOWYCH NA PRZYKŁADZIE ŁUKASIEWICZ – GIT

Streszczenie

Celem artykułu jest przedstawienie narzędzi wykorzystywanych w procesie komercjalizacji. Pierwsza część opracowania zawiera opis struktury organizacyjnej Sieci Badawczej Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny (GIT) oraz miejsce i rolę działu komercjalizacji. W artykule omówiono elementy podlegające analizie w ramach oceny potencjału komercjalizacyjnego realizowanych prac. Następnie przedstawiono proces oceny poziomu komercjalizacji wybranych prac rozwojowych realizowanych w Łukasiewicz – GIT.

Słowa kluczowe: komercjalizacja, własność intelektualna, proces zarządzania własnością intelektualną.

THE MEASUREMENT OF COMMERCIALIZATION CAPABILITY BASED ON THE DEVELOPMENT PROJECTS AT ŁUKASIEWICZ RESEARCH NETWORK – UPPER SILESIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Abstract

The aim of the article is to present the tools used in the commercialization process. The first part of the study contains a description of the organizational structure of the Łukasiewicz Research Network - Upper Silesian Institute of Technology (GIT) and the place and role of the commercialization department. The article discusses the elements to be analyzed as a part of the assessment of the commercialization potential of the works being carried out. Then, the process of assessing the level of commercialization of selected development works carried out in Łukasiewicz - GIT was presented.

Keywords: Commercialization, intellectual property, intellectual property management process

Szymon RUCZKA¹, Sławomir BONCEL²

IONANOFLUIDS – KOMPOZYCJA CIECZY JONOWYCH ORAZ NANOMATERIAŁÓW WĘGLOWYCH W KIERUNKU SUPERSMAROWNOŚCI

1. Wstęp

Siła tarcia jest przedmiotem pytań i badań już od czasów starożytnych Egipcjan. Próbowano zaradzić nadmiernemu użyciu siły przez stosowanie wody czy oleju. Następnie używano mieszanin olejowych, które z czasem nazwane zostały smarami. Smary początkowo były pozyskiwane z prostych substancji, takich jak mieszaniny oleju, tłuszczu zwierzęcego oraz wapienia. Wraz z rozwojem technologii budowy maszyn skład smarów ulegał zmianie. Odkrycia poczynione w XIX i XX wieku spowodowały, że smary zaczęły odgrywać znaczącą rolę w redukcji kosztów produkcji oraz eksploatacji urządzeń mechanicznych [1]. Proces wytwarzania oraz ich modyfikacji jest kluczowym aspektem ekonomicznym mającym wpływ na każdą gałąź przemysłu. Lubrykant spełniający cechy *green-tech* (ang. zielona technologia), a tym samym zapewniający wysoką wydajność pracy oraz niski współczynnik tarcia (ang. coefficient of friction, COF) zredukuje nakłady finansowe oraz energetyczne. Jednym ze sposobów na uzyskanie poprawy efektów funkcjonalnych przy jednocześnie niskich kosztach jest domieszkowanie konwencjonalnych smarów nanomateriałami [2]. Artykuł przybliży obecny stan wiedzy o dodatkach nanocząstek do smarów oraz przedstawia ich wpływ na wydajność pracy układów tribologicznych.

W artykule zostały omówione zagadnienia związane z charakterystyką nanolubrykantów, ich możliwym podziałem oraz opisem właściwości i możliwych zastosowań. Ponadto zostały przedstawione rodzaje dodatków w postaci nanomateriałów węglowych. Końcowo wskazano możliwe kierunki badań w najbliższej przyszłości.

¹ szymon.ruczka@polsl.pl, Katedra Chemii Organicznej, Bioorganicznej itp., Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/rch2/>, Centrum Elektroniki Organicznej i Nanohybrydowej (CONE)

² slawomir.boncel@polsl.pl, Katedra Chemii Organicznej, Bioorganicznej itp., Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/rch2/>, Centrum Elektroniki Organicznej i Nanohybrydowej (CONE)

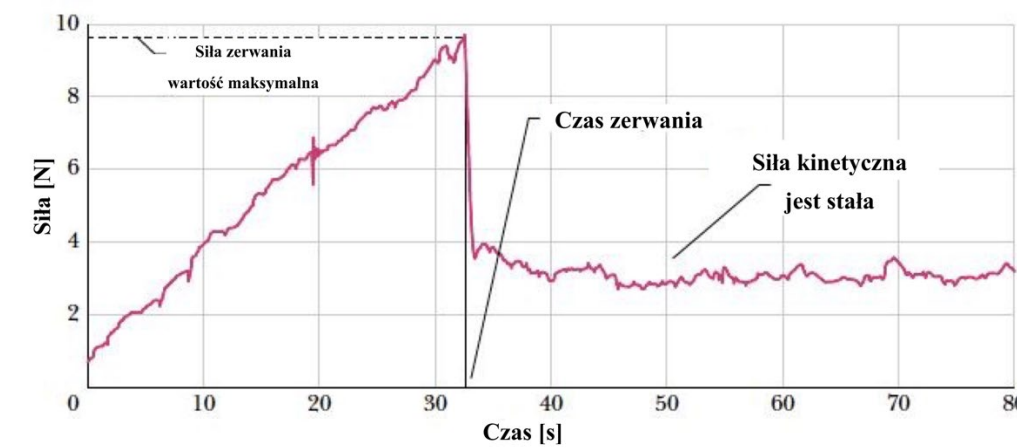
2. Tarcie i rola smaru

Tarcie, jako siła niezachowawcza, powoduje dyssypację energii w układzie, najczęściej w postaci ciepła. Zgodnie z **wzorem 1** siła tarcia dla ciała w ruchu jest zależna od empirycznie wyznaczonego współczynnika tarcia. Im większa jest wartość współczynnika tarcia, tym więcej siły przekształcane jest w ciepło [3].

$$F_f = \mu_s N \quad (\text{wzór 1 / eq. 1})$$

gdzie: F_f – siła tarcia, μ_s – współczynnik tarcia, N – siła normalna.

Wyróżniamy tarcie statyczne, które opisuje układ nieruchomy. Gdy siła styczna przekroczy wartość siły tarcia, następuje wyprowadzenie układu z równowagi. W ruchu jednostajnym siła tarcia oscyluje w danym zakresie, a współczynnik tarcia jest wyznaczany jako wartość stała. Wyznaczanie współczynnika tarcia polega na empirycznej analizie danej pary tribologicznej [4-5]. Na **rysunku 1A** przedstawiono zależność siły stycznej tarcia dla prostego układu przedstawionego na **rysunku 1B** w czasie od spoczynku do ruchu jednostajnego prostoliniowego [6].

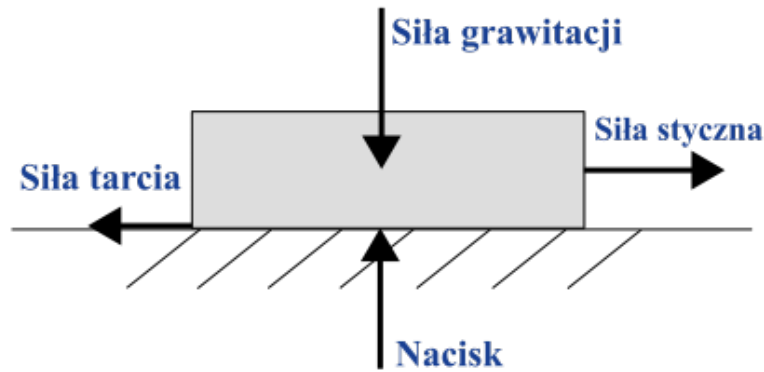


Rys. 1. Wykres siły tarcia statycznego oraz kinetycznego dla układu bloczka drewnianego na drewnianym blacie stołu

Fig. 1. Graph of the static and kinetic friction force for the setup of a block of wood on the wooden tabletop

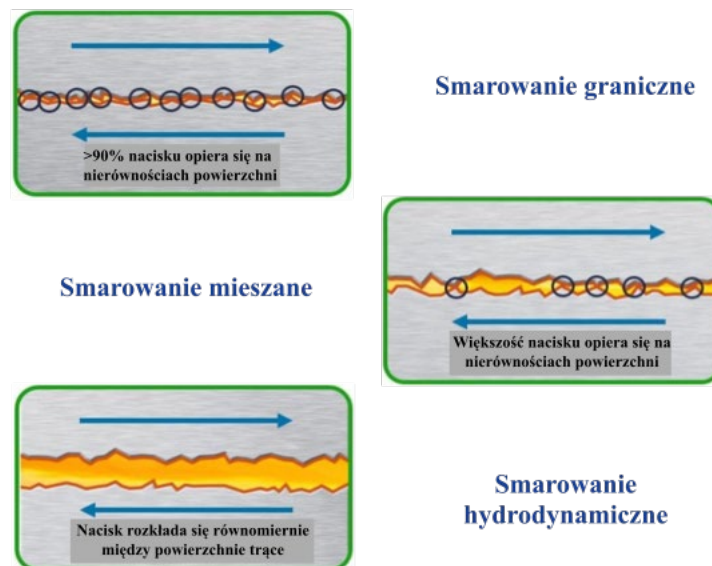
Źródło: <http://umdb.org.pbworks.com/w/page/46117252/Friction> [dostęp: 01.04.2023]

Moment przełamania siły tarcia statycznego charakteryzuje widoczna zmiana wartości siły stycznej koniecznej do poruszenia układu. Następnie siła tarcia kinetycznego może być mniejsza [7]. Zmiana wartości tej siły wynika z zerwania oddziaływań między-powierzchniowych pomiędzy dwiema powierzchniami, a redukcja wartości sił tarcia następuje przez zastosowanie smarów [8].



Rys. 2. Rozkład sił dla układu drewnianego bloczka na drewnianym blacie stołu
Fig. 2. Distribution of the forces for a setup of a wooden block on the wooden tabletop

Siła tarcia odpowiada za opór w ruchu jednego ciała względem drugiego, zużywanie się elementów maszyn oraz generuje energię cieplną [9]. W celu wydłużenia pracy danego układu stosuje się smary, które redukują zużycie części oraz odpowiadają za odprowadzanie ciepła [10]. Na **rysunku 3** został przedstawiony schemat obrazujący rolę smaru w układach mechanicznych. W zależności od mechanizmu można wyróżnić smarowanie graniczne, podczas którego smar może zostać uwięziony w mikrokraterach. Te mikroskopijne „zbiorniki” mogą służyć jako źródło ciągłego zasobu smaru i działać jako „zbiorniki” na oderwane z powierzchni cząsteczki materiału [11]. W przypadku smarowania hydrodynamicznego warstwa lubrykantu jest wystarczająco gruba, aby poszczególne powierzchnie materiału nie były w kontakcie fizycznym. Ogranicza to uszkodzenia mechaniczne powierzchni, zmniejsza powstawanie energii cieplnej oraz powoduje poprawę właściwości tribologicznych [12].



Rys. 3. Rola smaru w układach tribologicznych
Fig. 3. Functionality of a grease in the tribological systems

Źródło: <https://www.machinerylubrication.com/Read/30741/lubrication-regimes> [dostęp: 01.04.2023].

2.1. Rodzaje węzłów tarcia

Wpływ na siłę tarcia oraz rodzaj oddziaływania między powierzchniami czy smarem ma również rodzaj samego materiału. W celu redukcji kosztów wytwarzania elementów tribologicznych oraz wraz z postępującym rozwojem druku 3D powszechne może być stosowanie połączeń tribologicznych stal-polimer. COF takiej pary jest różny w zależności od przyjętego materiału polimerowego. W **tabeli 1** przedstawiono wybrane parametry par trybologicznych [13].

Tabela 1

Parametry par trybologicznych

Para tribologiczna		Parametr tribologiczny
		Współczynnik tarcia (COF)
Kula na dysku (20 N, 7 mm/s)	Polipropylen – Stal 304	0,165
	Stal 304 – Polipropylen	0,1
	Mosiądz H62 – Polipropylen	0,163
	Polipropylen – Mosiądz H62	0,263
	Stal 304 – PTFE	0,05
	PTFE – Stal 304	0,025
Test czterech kul 1 kula – 3 kule (100N, 300 rpm, -80°C)	Stal 304 – Polipropylen	0,26
	Polipropylen – Stal 304	0,349
	Stal 304 – PTFE	0,168
	PTFE – Stal 304	0,131
Kula na dysku (200 N)	Stal SAE52100 – stal nierdzewna z dodatkiem hmimPF ₆	0,065
	Stal SAE52100 – stal nierdzewna z dodatkiem PAO	0,105

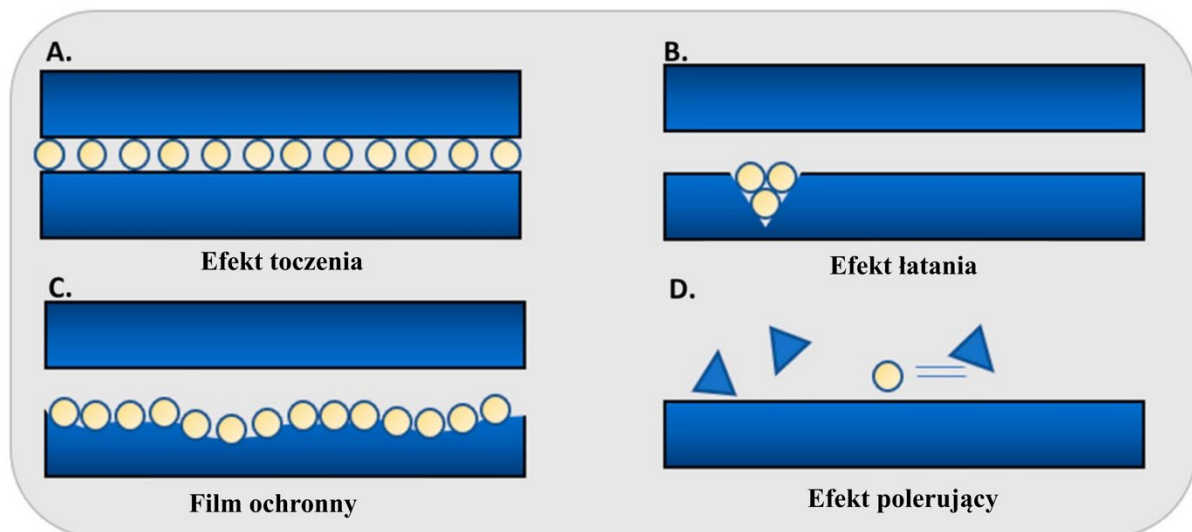
Zmiany współczynnika tarcia zależą od rodzaju materiału polimerowego czy metalu oraz wzajemnego oddziaływania metal-polimer, metal-smar, polimer-smar [14-15]. Oddziaływania pomiędzy poszczególnymi elementami układu mogą ulec zmianie pod wpływem dodatków [16].

2.2. Rodzaje smarów

Smar stosowany w układach mechanicznych może różnić się składem oraz parametrami fizycznymi. Podczas wprowadzania lubrykantu zmieniamy parametry pracy danego układu. Na tarcie suche wpływ mają środowisko oraz parametry materiału badanej pary tribologicznej. W przypadku tarcia smarowanego do naszego układu wprowadzamy dodatkowe składowe: adhezja smaru do podłoża, kohezja smaru, lepkość smaru, chropowatość powierzchni, deformacja powierzchni oraz zanieczyszczenie powierzchni [17]. Badania wskazują również na możliwość stosowania cieczy jonowych jako lubrykantów [18-20]. Próba domieszkowania takowych może spowodować zmiany parametrów, a tym samym polepszenie wartości współczynnika tarcia. Badacze stosują również cieczy jonowe jako dodatki do przemysłowych smarów. Ze względu na swoją budowę pomiędzy cząsteczkami poszczególnych cieczy jonowych możemy wyróżnić oddziaływania jonowe oraz wiązania wodorowe. W przypadku cząsteczek niemających ładunku wyróżnić możemy oddziaływania van der Waalsa [21-23].

2.3. Dodatki nanomateriałów węglowych

Chropowatość powierzchni może powodować ścieranie wierzchniej warstwy materiału i tym samym jego dalszą penetrację przez smar czy oderwane cząsteczki materiału. Może to doprowadzić do uszkodzenia układu tribologicznego i konieczności wymiany niesprawnego elementu [24-26]. Dodatki w postaci nanomateriałów mogą przeciwdziałać takim sytuacjom na podstawie różnych mechanizmów [27]. Na **rysunku 4** przedstawiono poszczególne mechanizmy oddziaływania dodatków nanomateriałowych z powierzchnią lub filmem smarnym.

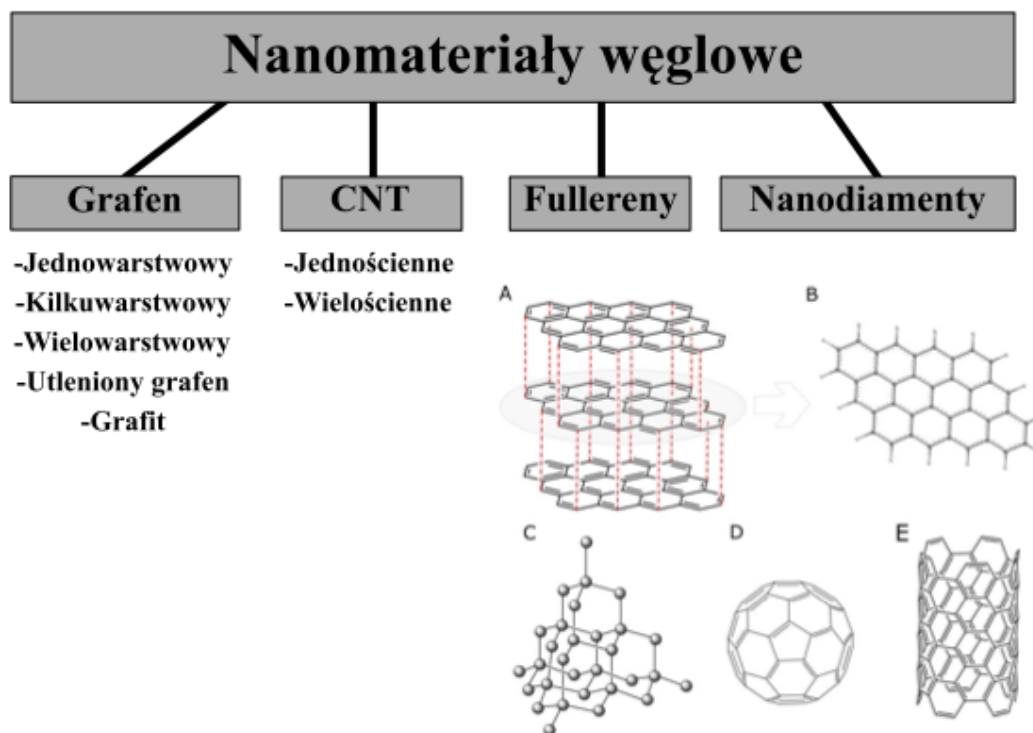


Rys. 4. Mechanizmy działania nanomateriałów w układach tarcia

Fig. 4. Mechanisms of action of nanomaterials in friction systems

Źródło: Cortes V., Ortega J.A., Evaluating the Rheological and Tribological Behaviors of Coconut Oil Modified with Nanoparticles as Lubricant Additives, Lubricants, 2019, 7, 76.

Dla nanomateriałów węglowych zostało opracowanych wiele sposobów funkcjonalizacji powierzchni, co kreuje szerokie spektrum możliwości przeprowadzenia badań [28-30]. Najbardziej powszechnymi i znanymi materiałami są nanorurki węglowe (ang. carbon nanotubes, CNTs), grafit, grafen, fullereny oraz nanodiamenty (rys. 5) [31].



Rys. 5. Podział podstawowych nanomateriałów węglowych: A – grafit, B – grafen, C – nanodiament, D – fulleren, E – SWCNT (jednościenne nanorurki węglowe)

Fig. 5. Division of basic carbon nanomaterials: A – graphite, B – graphene, C – nanodiamond, D – fullerene, E – SWCNT (single walled carbon nanotubes)

Opracowano na podstawie: A. Barhoum i inni, A Broad Family of Carbon Nanomaterials: Classification, Properties, Synthesis, and Emerging Applications, Handbook of Nanofibers, 2019, 1-40.

3. Wpływ dodatków nanomateriałów na właściwości

Nanomateriały stosowane jako dodatki do smarów pozwalają na uzyskanie nowych właściwości i parametrów wśród obecnie istniejących lubrykantów. Dodatki nanocząstek miedzi, srebra czy złota są stosowane w komercyjnych olejach do silników, w smarach do łańcuchów i przekładni. Nanocząstki ze względu na swój rozmiar oddziałują bezpośrednio z powierzchnią ścieralną przez toczenie po powierzchni, uzupełniając doliny, tworząc ochronny film czy polerując powierzchnię [32].

Wpływ nanomateriałów węglowych nie jest w pełni zbadany, ponieważ w zależności od przyjętego układu (pary tribologicznej) i rodzaju smaru proces ten będzie się różnił. Różne mechanizmy działania poszczególnych odmian nanomateriałów powodują, że jedynie

empiryczne próby pozwolą określić dokładne parametry lubrykantu. W **tabeli 2** przedstawiono zbiór wyników uzyskanych dla wybranych układów [33-40].

Tabela 2

Nanomateriały węglowe jako dodatki do smarów

Badany układ		Parametr trybologiczny
		współczynnik tarcia (COF)
Siła nacisku 10 N, kula na dysku w próżni (stal – stal)	BMIMBF4	0,098
	BMIMBF4 – Nanoarkusz grafenu (0,075 mg/ml)	0,093
	BMIMBF4 – MWCNTs (0,075 mg/ml)	0,047
Siła nacisku 30 N, kula na dysku w próżni (stal – stal)	BMIMBF4	0,075
	BMIMBF4 – Nanoarkusz grafenu (0,075 mg/ml)	0,057
	BMIMBF4 – MWCNTs (0,075 mg/ml)	0,150
Siła nacisku 1 N, płytka – płytka (stal – stal), pokrycie grafitowe w powietrzu	Grafit stały rozproszony na powierzchni płytek	0,17
Siła nacisku 1 N, płytka-płytka (stal – stal), pokrycie grafitowe w azocie	Grafit stały rozproszony na powierzchni płytek	0,80
Siła nacisku 0,4 N, kula na płytce (stal – krzem)	Utleniony grafit (GOx) osadzony na płytce krzemowej	0,05
Siła nacisku 0,1 N, Al ₂ O ₃ -TiC suwak – podłoże z fullerenami C ₆₀	Fullereny C ₆₀ osadzone sublimacyjnie na powierzchni płytki	0,04-0,12
Siła nacisku 10 N, kula na płytce (52100 stal – stal węglowa)	2% sferyczne nanodiamenty w oleju P100N	0,88 (w odniesieniu do czystego oleju P100N)
Siła nacisku 6 N, trzpień stalowy P20 na płytce AA7075 aluminium (300°C)	Grafit w wodzie (niesprecyzowane)	Początkowo 0,15 – do 1,0
Ciśnienie 1,1 GPa, koło – szyna (stal – stal; materiały przemysłowe pobrane od producentów)	0,01% SWCNT w oleju (niesprecyzowany)	0,066
Ciśnienie 1,1 GPa, koło – szyna (stal – stal; materiały przemysłowe pobrane od producentów)	0,01% SWCNT w wodzie	0,148

Analiza poszczególnych par trybologicznych wymaga wskazania zastosowania oraz przyjęcia pewnych założeń. Termin supersmarowność przyjmujemy dla układu, którego współczynnik tarcia (COF) nie przekracza 0,01, takie układy wymagają jednak specyficznych warunków. Technologia supersmarów może zostać zastosowana w układach MEMS (mikroukład elektromechaniczny), technologii kosmicznej czy w codziennym użytkowaniu.

4. Podsumowanie

Badania w zakresie dodatków nanomateriałów węglowych do smarów są prowadzone na styku tribologii, chemii organicznej oraz fizyki ciała stałego i cieczy wspomaganej obliczeniami kwantowo-mechanicznymi. Prace nad nowymi układami trybologicznymi charakteryzującymi się wartościami $COF < 0,01$ trwają, a w przyszłości mogą pozwolić na redukcję zużycia energii oraz kosztów utrzymania układów zawierających różne pary trybologiczne [41]. Postępujący rozwój druku 3D oraz rosnące ceny stali mogą przyczynić się także do wprowadzenia elementów wykonanych z materiałów polimerowych do maszyn codziennego użytku. Proces analizy poszczególnych par trybologicznych można przyspieszyć przez wykorzystanie metod symulacji komputerowej z zastosowaniem np. dynamiki molekularnej [42].

Podziękowania

Autorzy są wdzięczni za wsparcie finansowe z grantu Narodowego Centrum Nauki nr 2020/39/B/ST5/02562 w ramach programu OPUS-20.

Bibliografia

1. Seireg A.A., *Friction and lubrication in mechanical design*, Marcel Dekker Inc., New York 1998.
2. Imran A, et al. *Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers*, J. Mol. Liq., 2019, 251-266.
3. Hanaor D., Gan Y., Einav I., *Static friction at fractal interfaces*, Tribology International, 2016, 93, 229-238.
4. <https://home.agh.edu.pl/~wslosar/siodmy.html> [dostęp: 1.04.2023].
5. Bird J.O., Chivers P.J., *Newnes Engineering and Physical Science Pocket Book*, Newnes, 1993, 235-237.
6. <http://umdberg.pbworks.com/w/page/46117252/Friction> [dostęp: 1.04.2023].
7. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/frict2.html> [dostęp: 2.04.2023].

8. Nikolakopoulos P.G., Bompos D.A., *Experimental measurements of journal bearing friction using mineral, synthetic, and bio-based lubricants*, *Lubricants*, 2015, 3, 155-163.
9. Lu P., Wood R.J., Gee M.G., Wang L., Pflieger W., *The friction reducing effect of square-shaped surface textures under lubricated line-contacts—An experimental study*, *Lubricants* 2016, 4, 26.
10. Shum P., Zhou Z., Li K., *Investigation of the tribological properties of the different textured dlc coatings under reciprocating lubricated conditions*, *Tribol. Int.*, 2013, 65, 259-264.
11. Zhang H., Zhang D., Hua M., Dong G., Chin K., *A study on the tribological behavior of surface texturing on babbitt alloy under mixed or starved lubrication*, *Tribol. Lett.* 2014, 56, 305-315.
12. Tala-Ighil N., Fillon M., Maspeyrot P., *Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing*, *Tribol. Int.* 2011, 44, 211-219.
13. Xu A., Tian P., Wen S., Guo F., Hu Y., Jia W., Tian Y., *Differences in Tribological Behaviors upon Switching Fixed and Moving Materials of Tribo-pairs including Metal and Polymer*, *Scientific Reports*, 2017, 7, 13041.
14. Straffelini G., *Friction and wear methodologies for design and control. Springer Tracts in Mechanical Engineering*, Springer International Publisher, 2015, 1-158.
15. Czichos H., Lee L.H., *Polymer Wear, and Its Control*, Washington: American Chemical Society, 1985, 3-26.
16. Dai W., Kheireddin B., Gao H., Liang H., *Roles of nanoparticles in oil lubrication*, *Tribol. Int.*, 2016, 102, 88-98.
17. Lugt P.M., *A review on grease lubrication in rolling bearings*, *Tribol. Trans.*, 2009, 52, 470-480.
18. Somers A.E., Howlett P.C., MacFarlane D.R., Forsyth M.A., *Review of Ionic Liquid Lubricants*, *Lubricants*, 2013; 1(1), 3-21.
19. Panja S.K., *Tribological Properties of Ionic Liquids: Tribology in Materials and Manufacturing*, IntechOpen, 2021.
20. Yan Zhou, Jun Qu, *Ionic Liquids as Lubricant Additives: A Review*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(4), 3209-3222.
21. Qu J.; Bansal D.G., Yu B., Howe J.Y., Luo H.M., Dai S., Li H.Q., Blau P.J., Bunting B.G., Mordukhovich G., Smolenski D.J., *Antiwear Performance and Mechanism of an Oil-Miscible Ionic Liquid as a Lubricant Additive*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2012, 4, 997– 1002.
22. Bermudez M.D., Jimenez A.E., Sanes J., Carrion F. J., *Ionic Liquids as Advanced Lubricant Fluids*, *Molecules*, 2009, 14, 2888-2908.
23. Jimenez A.E., Bermudez M.D., Carrion F.J., Martinez-Nicolas G., *Room Temperature Ionic Liquids as Lubricant Additives in Steel-Aluminium Contacts: Influence of Sliding Velocity, Normal Load and Temperature*, *Wear* 2006, 261, 347-359.

24. Akchurin A., Bosman R., Lugt P.M., *Analysi of wear particles formed in boundary-lubricated sliding contacts*, Tribol. Lett., 2016, 63, 16.
25. Zmitrowicz A., *Wear Debris: A review of properties and constitutive models*, J. Theor. Appl. Mech., 2005, 43(1), 3-35.
26. Finkin E.F., *The wear of copper, aluminum, mild steel, and zinc, and their wear particle shape factors*, ASLE Transactions, 2008, 7, 377-382.
27. Cortes V., Ortega J.A., *Evaluating the Rheological and Tribological Behaviors of Coconut Oil Modified with Nanoparticles as Lubricant Additives.*, Lubricants, 2019, 7, 76.
28. Hirsch A., Vostrowsky O., *Functionalization of Carbon Nanotubes: Functional Molecular Nanostructures*. Topics in Current Chemistry, 2005, Springer, Berlin, Heidelberg.
29. Georgakilas V., Otyepka M., Bourlinos A.B., Chandra V., Kim N., Kemp K.C., Hobza P., Zboril R., Kim K.S., *Functionalization of Graphene: Covalent and Non-Covalent Approaches, Derivatives and Applications*, Chem. Rev. 2012, 112(11), 6156-6214.
30. Shangfeng Yang, Lingbo Jia, Muqing Chen, *Functionalization of fullerene materials toward applications in perovskite solar cells*, Materials Chemistry Frontiers, 2020, 4(8).
31. Barhoum A., Shalan A.E., El-Hout S.I., Ali G.A.M., Abdelbasir S.M., Abu Serea E.S., Ibrahim A. H., Pal K., *A Broad Family of Carbon Nanomaterials: Classification, Properties, Synthesis, and Emerging Applications*, Handbook of Nanofibers, 2019, 1-40.
32. Azman N.F., Samion S., *Dispersion Stability and Lubrication Mechanism of Nanolubricants: A review*, INT J PR ENG MAN-GT, 2019, 6, 393-414.
33. Zhai W., Srikanth N., Kong L.B., Zhou K., *Carbon nanomaterials in tribology*, Carbon 2017, 119, 150-171.
34. Duan L., Li J., Duan H., *Nanomaterials for lubricating oil application: A review*, Friction, 2023, 11(5), 647-684.
35. Ali I., Basher A.A., Kucherova A., Memetov N., Pasko T., Ovchinnikov K., Pershin V., Kuznetsov D., Galunin E., Grachev V., Tkachev., *Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers*, Jour. Molecular Liquids, 2019, 279, 251-266.
36. Gao Q., Liu S., Hou K., Li Z., Wang J., *Graphene-Based Nanomaterials as Lubricant Additives: A Review*, Lubricants, 2022, 10(10), 273.
37. Rahman M., Islam M., Roy R., Younis H., Alnahyan M., Younes H., *Carbon Nanomaterial-Based Lubricants: Review of Recent Developments*, Lubricants, 2022, 10(11), 281.
38. Rasheed A.K., Khalid M., Rashmi W., Gupta T.C.S.M., Chan A., *Graphene based nanofluids and nanolubricants – Review of recent developments*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 63, 346-362.
39. Moghadam A.D., Omrani E., Menezes P.L., Rohatgi P.K., *Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene – A review*, Composites Part B, 2015, 77, 402-420.

40. Zhang L., Pu J., Wang L., Xue Q., *Frictional dependence of graphene and carbon nanotube in diamond-like carbon/ionic liquids hybrid films in vacuum*, Carbon, 2014, 80, 734-745.
41. Chen X., Li J., *Superlubricity of carbon nanostructures*, Carbon 2020, 158, 1-23.
42. Ma Q., Wang W., Dong G.N., *Achieving Macroscale Liquid Superlubricity Using Lubricant Mixtures of Glycerol and Propanediol*, Tribology Letters, 2021, 69, 159.

IONANOFLUIDS – KOMPOZYCJA CIECZY JONOWYCH ORAZ NANOMATERIAŁÓW WĘGLOWYCH W KIERUNKU SUPERSMAROWNOŚCI

Streszczenie

Lubrykanty, nazywane również smarami, stosowane są w urządzeniach mechanicznych jako reduktory tarcia. Redukcja tarcia powoduje zmniejszenie ilości potrzebnego paliwa do napędzenia mechanizmów oraz zabezpiecza elementy przed zniszczeniem. W pracy omówiono wpływ nanomateriałów węglowych na właściwości lubrykantów oraz przedstawiono wybrane wartości tribologiczne dla najprostszycy materiałów. Porównano współczynniki tarcia (COF) dla poszczególnych układów.

Słowa kluczowe: smary, nanomateriały węglowe, nanotechnologia, ciecze jonowe, supersmarność

IONANOFLUIDS – COMPOSITION OF IONIC LIQUID AND CARBON NANOMATERIALS TOWARDS SUPERLUBRICITY

Abstract

Lubricants, also known as greases, are used in mechanical devices as friction reducers. Friction reduction eliminates the amount of fuel needed to drive the mechanisms and protects the elements from damage. The paper discusses the influence of carbon nanomaterials on the properties of lubricants and presents selected tribological values for the simplest materials. Friction coefficients (COF) for individual systems were compared.

Keywords: grease, carbon nanomaterials, nanotechnology, ionic liquid, superlubricity

Paweł SŁOWIŃSKI¹

SPOSOBY IDENTYFIKACJI POJAZDÓW SZYNOWYCH W ASPEKTCIE WYKORZYSTANIA POJEMNOŚCI INFORMACYJNEJ SYGNAŁÓW WIBROAKUSTYCZNYCH

1. Wstęp

1.1. Rodzaje pociągów towarowych

Rozróżniając rodzaje pociągów towarowych mamy, przede wszystkim na myśli użyte do tego celu typy lokomotyw i wagonów. Proces ten jest natomiast bardziej skomplikowany, niż mogłoby się to wydawać, ze względu na bardzo szczegółowe podziały tychże pociągów. Pociągi towarowe, ich rodzaje, charakteryzujemy ze względu na ładunek (wielkość, masę), zasięg (lokalny, międzynarodowy charakter pociągu) oraz na uwzględniony charakter użytych środków transportowych. W Polsce najczęściej można wyróżnić następujące rodzaje pociągów towarowych:

- Pociągi towarowe do przewozów ładunków niemasywnych (TN)
- Pociągi towarowe do przewozów ładunków masowych (TM)
- Pociągi towarowe bezpośrednie (TOB)
- Pociągi towarowe grupowe (pośrednie) (TOP)
- Pociągi zbiorowe (TZ)
- Pociągi zdawcze w obrębie węzła (TKW) i na linii (TKL)
- Pociągi towarowe bocznicowe (TB)
- Pociągi towarowe kopalniane (TK)
- Pociągi towarowe do przewozów intermodalnych

Każdy z przedstawionych rodzajów ma własną klasyfikację oraz różnice z nich wynikające.

¹ Pawel.slowinski@polsl.pl, Katedra Transportu Drogowego, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/rt1/>

1.2. Rodzaje pociągów pasażerskich

Rodzaje pociągów pasażerskich zastosowanych w Polsce bardzo zmieniły się od roku 1989. Uwolnienie rynku kolejowego dla przewoźników innych niż PKP spowodowało restrukturyzację na kolei również w funkcjonowaniu spółek i podział nie tylko na pasażersko-towarowe spółki, lecz także podpodziały wewnątrz tych spółek. Analizując rodzaje pociągów pasażerskich, mamy zazwyczaj na myśli potoczne regionalne i pospieszne, natomiast sytuacja na kolei jest o wiele bardziej skomplikowana. Pociągi pasażerskie dzielą się na:

- EuroCity (EC)
- InterCity (ICC)
- ekspresowe (EX)
- pospieszne (D) – dawniej (P i M)
- osobowe (O)

Podział ten wynika przede wszystkim z dwóch czynników: prędkości, w jakiej kursują, i liczby stacji kolejowych, na których się zatrzymują. Kolejność wyżej przedstawiona nie jest przypadkowa, ponieważ pociągi typu EC są pociągami o najwyższym wskaźniku średniej prędkości pokonywanej na szlaku i najmniejszej liczbie stacji kolejowych, na których się zatrzymują. Dodatkowo są to pociągi, których zasięg jest międzynarodowy. Następnie składy IC i EX (rzadziej stosowane) są to pociągi o charakterze krajowym, ale w równym stopniu szybkie jak pociągi EC. Dodatkowo cena usług jest znacznie wyższa od pociągów pospiesznych. Te natomiast stanowiły kiedyś bardzo powszechną formę transportu pasażerów. Mniej więcej w ciągu kilku lat zostały usunięte i zastąpione pociągami TLK (Tanie Linie Kolejowe) zarządzanymi przez PKP Intercity, wcześniej były one pod pieczę Przewozów Regionalnych (PR). Obecnie pod zarządem PR pozostały pociągi Regioexpres i interRegio, które można zaliczyć do pociągów pospiesznych. Największy chaos na kolei wzbudził podział pociągów osobowych, obecnie przewozy te pozostają praktycznie tylko pod zarządem województw, które przejmując linie od PR, stają się jednocześnie przewoźnikiem kolejowym.

Z uwagi na charakter kursowania pociągi pasażerskie dzielą się na:

- pociągi stałe, kursujące zgodnie z ustaleniami w służbowym rozkładzie jazdy,
- pociągi niestałe, do których należą pociągi dodatkowe (przewidziane w rozkładzie jazdy, uruchamiane w razie konieczności) oraz nadzwyczajne (nieprzewidziane w rozkładzie jazdy, uruchamiane wg specjalnego rozkładu).

2. Rodzaje systemów identyfikacji pojazdów szynowych

Systemy identyfikacji pojazdów szynowych stosowane w Polsce można wyróżnić ze względu na ich charakter i cel instalacji w obszarze skrajni kolejowej. W ostatnich latach

znacznie rozwinięto technologię systemów opartych na inteligentnych mechanizmach (ITS – Intelligent Transport Systems oraz IIS – Intelligent Infrastructure System). Mechanizmy te, stosowane licznie w transporcie drogowym w ostatniej dekadzie, również w Polsce, powoli odnoszą sukces również w obszarze kolejnictwa. Mogą one w przyszłości rozwiązać problem związany z integracją systemów, unifikacją oraz standaryzacją. Dzięki realizowanym licznym modernizacjom oraz rozbudowie infrastruktury coraz częściej zarządcy infrastruktury sięgają po nowoczesne rozwiązania z zakresu identyfikacji pojazdów szynowych. Dodatkowymi aspektami skłaniającymi do modernizacji są presja społeczeństwa oraz oczekiwania z zakresu bezpieczeństwa, niezawodności oraz punktualności i efektywnego wykorzystania infrastruktury.

Ze względu na coraz nowocześniejsze elementy z zakresu zarządzania infrastrukturą kolejową zmniejsza się rola człowieka w zakresie funkcji sterowania oraz zarządzania przewozami. Coraz częściej pojawiają się scentralizowane jednostki, w tym obszarowe centra sterowania ruchem kolejowym. Zauważalnie wzrosły zainteresowanie i implementacja automatycznych systemów doradczych stworzonych według przyjętych wcześniej algorytmów postępowania.

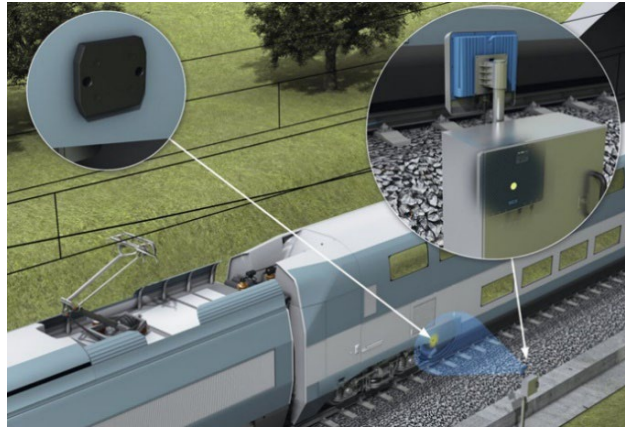
Bardzo ważnymi aspektami z punktu widzenia zarządzania taborem są pozyskiwanie i wymiana niezbędnych informacji w procesie optymalizacji procesów transportowych. Ważny jest czas, w którym informacja dotrze do odbiorcy i właściwie zostanie przetworzona i przeanalizowana.

Należy również zwrócić uwagę na potrzebę powstawania systemów identyfikacji pojazdów z punktu widzenia systemów informacji pasażerskiej. Współcześnie coraz bardziej wymaga się szczegółowych informacji o położeniu, kolejności pociągów na linii kolejowej, liczbie oraz typie wagonów oraz np. lokalizacji drzwi wagonów jako elementu taboru kolejowego.

Pod uwagę należy również brać fakt, że obecnie stosowane systemy na sieci PKP PLK S.A. nie umożliwiają sprawnej identyfikacji poszczególnych składów kolejowych, co może powodować w pewnych niesprzyjających warunkach błędne komunikaty dla pasażerów.

Metodami rzadziej stosowanymi, ale coraz częściej pojawiającymi się na polskich torach, są systemy oparte przykładowo na identyfikacji taboru przez systemy wizyjne – dzięki metodom opartym na rozwiązanych automatycznych oraz doświadczeniu z transportu drogowego, gdzie systemy ITS z powodzeniem stosowane są od wielu lat, możliwe było zaimplementowanie gotowych rozwiązań dla transportu kolejowego. Minusem takiego rozwiązania jest wciąż niedoskonałość odczytu w gorszych warunkach pogodowych, takich jak mgła, śnieg, ale również nocna pora, bez wystarczającego oświetlenia. Drugim systemem sporadycznie stosowanym jest ten oparty na technologii RFID (Radio Frequency Identification) – systemy wywodzące się wprost z doświadczenia branży logistycznej znalazły zastosowanie również w transporcie kolejowym. Systemy radiowe w przeciwieństwie do paskowych mają przewagę ze względu na mniejszą wrażliwość na zakłócenie odczytu danych o taborze. Minusem jest wyższa cena wykorzystania takich rozwiązań ze względu na

umieszczanie czipów na każdym wagonie i każdej lokomotywie oraz stosowanie odpowiednich bramownic odczytujących z nich dane. Plusem jest możliwość czasowego użycia przez mobilność takiego rozwiązania.

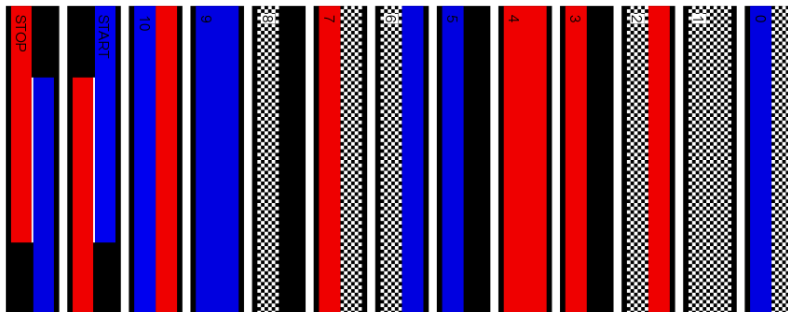


Rys. 1. Przykład implementacji systemu RFID RFU630 przez producenta SICK

Fig. 1. An example of the implementation of the RFID RFU630 system by the manufacturer SICK

Źródło: sick.com

Kody paskowe/ kody QR – stosowane zamiennie lub dodatkowo z kodami RFID – to prostsza i tańsza alternatywa będąca rozwinięciem identyfikacji przez obserwację wzrokową, wrażliwa na zanieczyszczenia oraz zniszczenia farby z oznaczeniami kodowymi.



Rys. 2. Przykład niestosowanego już systemu kodowania KarTrak, który uznaje się za prekursora obecnie wykorzystanych systemów znakowania kodami kreskowymi. Projekt porzucony w latach 70. przez problemy techniczne

Fig. 2. An example of the no longer used KarTrak coding system, which is considered to be the precursor of the currently used barcode marking systems. The project was abandoned in the 1970s due to technical problems

Źródło: Ceros.com

Coraz rzadziej stosuje się metody oparte na identyfikacji taboru przez obserwację wzrokową i dalszą z tym związaną analizę dokumentów przewozowych.

W przypadku identyfikacji numerycznej zgodnie z Dz.U. z 2020 r. poz. 1043 o transporcie kolejowym przewoźnik kolejowy lub zarządca może realizować prace przewozową jedynie pojazdami kolejowymi oznaczonymi wg systemu EVN (ang. European Vehicle Number), o ile prezes UTK nie wyraził zgody na oznakowania odrębne od EVN.

Na europejski numer pojazdu (EVN) składają się odpowiednio uszeregowane i umiejscowione cyfry i znaki, które określają:

- rodzaj taboru (1. cyfra),
- zdolność pojazdu do interoperacyjności (1. i 2. cyfra),
- państwo rejestracji pojazdu kolejowego (3. i 4. cyfra),
- charakterystykę techniczną pojazdu (cyfry 5-7 w przypadku pojazdów trakcyjnych, cyfry 5-8 dla pozostałych rodzajów taboru);
- numer seryjny (cyfry 8-11 w przypadku pojazdów trakcyjnych, cyfry 9-11 dla pozostałych rodzajów taboru);
- cyfrę kontrolną (12. cyfra).

Dodatkowo należy nadmienić, że na oznaczenie literowe charakterystyki technicznej pojazdu kolejowego składają się:

- w wagonach pasażerskich: oznaczenie serii wagonu w postaci liter dużych i małych, określających rodzaj oraz przeznaczenie wagonu pasażerskiego; oznaczenie liczby przedziałów w wagonie pasażerskim w postaci indeksu górnego, umiejscowionego bezpośrednio po ostatniej literze oznaczenia literowego serii wagonu pasażerskiego; oznaczenie powinno być umieszczone na każdym wagonie pasażerskim z wyjątkiem wagonów: restauracyjnych, pocztowych, bagażowych, bagażowo-pocztowych, specjalnego znaczenia (służbowych, socjalnych, salonowych, konferencyjnych, dyskotekowych, barowych, kinowych, wideo i do przewozu chorych) oraz wagonów do przewozu samochodów; oznaczenie indeksu wagonu w postaci liter małych, określających szczegółowe cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne wagonu pasażerskiego;
- w wagonach towarowych: oznaczenie serii wagonu w postaci liter dużych, określających kategorię wagonu towarowego; oznaczenie indeksu wagonu w postaci liter małych, określających szczegółowe cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne wagonu towarowego.

94 51 2 130 297-6 PL-PREG
33 RIV
56 SK-AXBSK
5331 202-5

Rys. 3. Przykładowe identyfikatory pojazdów kolejowych

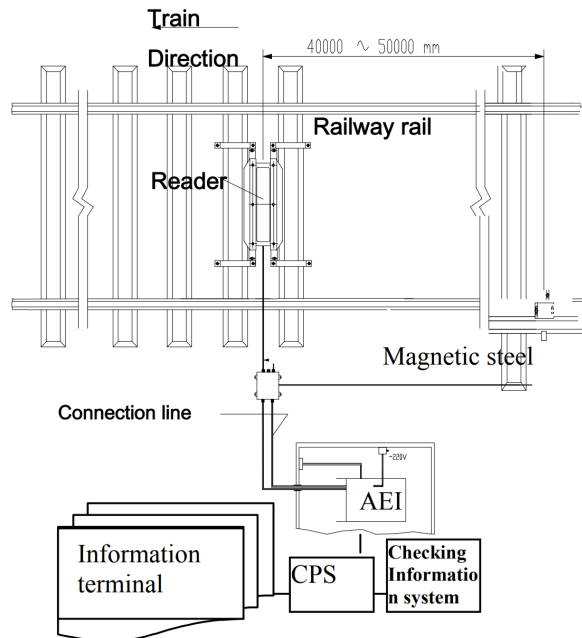
Fig. 3. Examples of rail vehicle identifiers

Źródło: „Tabor Kolejowy” 2019 UTK

Informacja taka jest przydatna do dalszej możliwości zakodowania jej np. w postaci kodów QR lub przez technologię RFID.

W Chinach natomiast istnieje system automatycznej identyfikacji składów kolejowych opartych na technologii RDID (ATIS). Pomimo bardzo udanego działania systemu opartego na

ATIS RFID dla pociągów konwencjonalnych o prędkościach do 150 km/h nie rozwiązano wielu kwestii związanych z rozszerzeniem tej technologii na rejestrację składów typu KDP o prędkościach do 500 km/h.

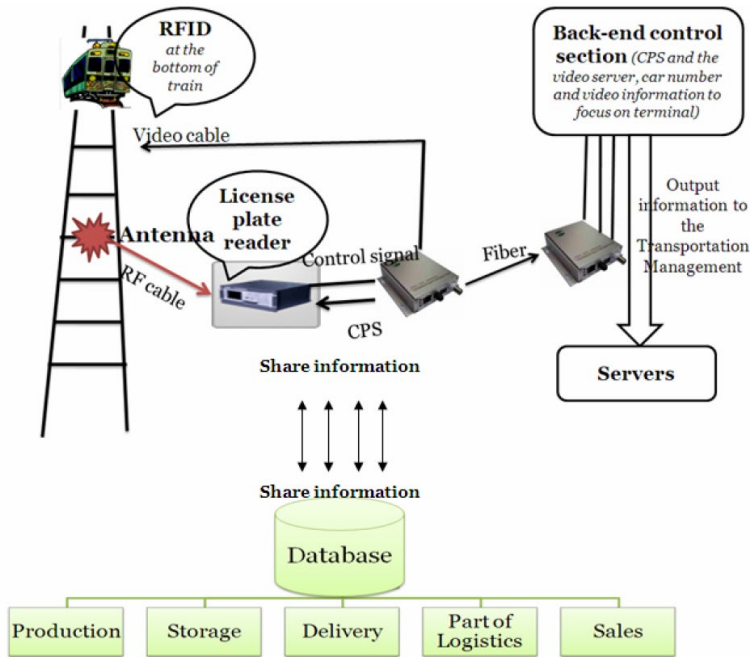


Rys. 4. Istniejący system ATIS i jego architektura

Fig. 4. The existing ATIS system and its architecture

Źródło: Gong Ch., Fan W. A new automatic train identification system based on RFID, WISE 2010, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011

Technologia RFID jest szeroko stosowana w automatyce przemysłowej, automatyce biznesowej, kontroli i zarządzaniu transportem, bezpieczeństwie i wielu innych dziedzinach. Autorzy mieli na celu przedstawienie lepszej identyfikacji, zarządzania i wdrażania z wykorzystaniem Internetu Rzeczy. Na podstawie analizy ATIS wyróżnia się cztery moduły: funkcjonalny, aplikacyjny, szkielet fizyczny systemu, szkielet oprogramowania systemowego. System ten nie został zaadaptowany do chińskiej sieci ze względu na braki integracji wewnętrznych systemów i opisów – istnieje tylko podstawowy system ATIS bez modułu 4.0.

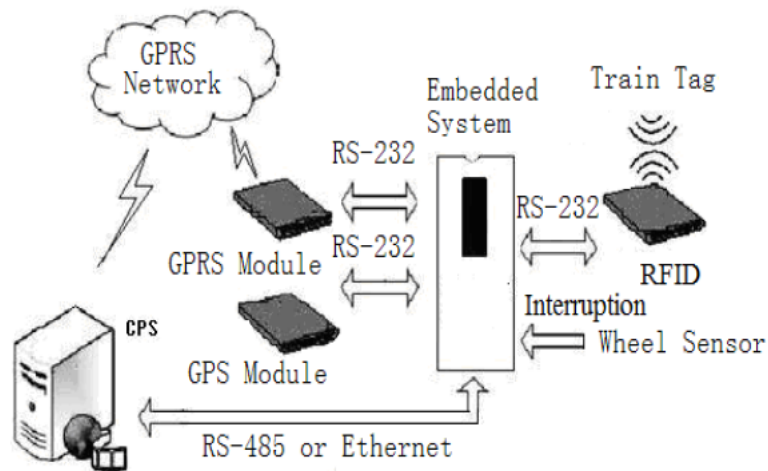


Rys. 5. Propozycja autorów w celu połączenia systemu ATIS do Internetu Rzeczy w ramach działania przemysłu 4.0

Fig. 5. The authors' proposal to connect the ATIS system to the Internet of Things as part of industry 4.0

Źródło: Gong Ch., Fan W. A new automatic train identification system based on RFID, WISE 2010, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg 2011.

Podobny system co ten przedstawiony wyżej zaprezentowano już w roku 2009 w artykule [31]. Wykorzystano również czujnik RFID, natomiast dodano moduły komunikacji takie jak RS 232 czy systemy GPS/GPRS połączone do sieci Internet. Schemat działania tego systemu przedstawiono na rysunku 6.

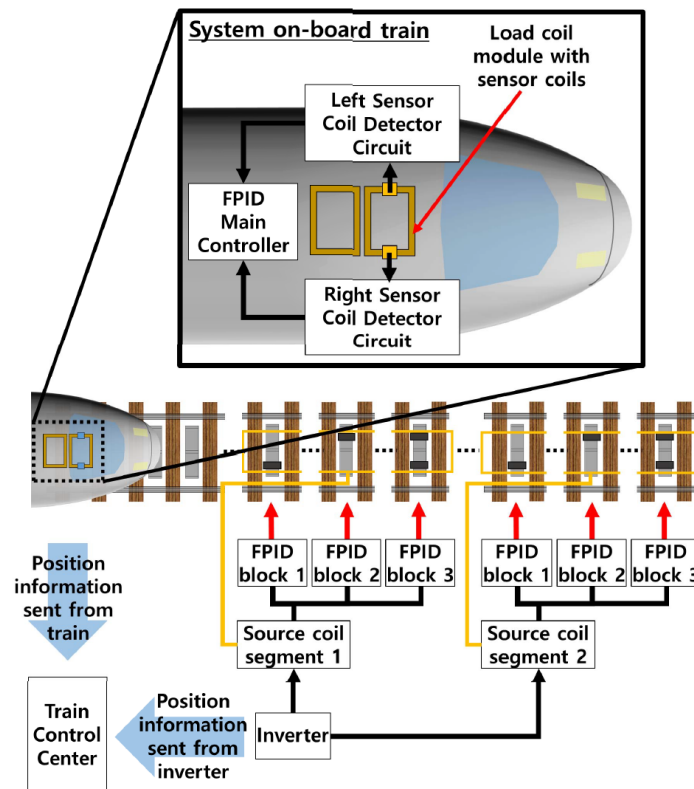


Rys. 6. Schemat działania systemu „Wireless intelligent train identification system”

Fig. 6. Schematic diagram of the “Wireless intelligent train identification system”

Źródło: Ye J., Shi L., He H., Design of Wireless Intelligent Train Identification System Based on GPS/GPRS. IEEE 2009

Autorzy w artykule [26] zaproponowali rozwiązanie mające na celu identyfikowanie składów (ich pozycji) na podstawie systemu WPT (Wireless power transfer) i jego modyfikacji w postaci FPID (Ferrite position identification). W artykule zaproponowano nowy system, który dostarcza informacji o położeniu pociągu za pomocą segmentu cewki źródłowej. Składa się z wbudowanych cewek czujników, bloków ferrytowych zaprojektowanych z wykorzystaniem określonych informacji o położeniu oraz detektora. Proponowany system można wdrożyć za pomocą cewki źródła i cewki obciążenia WPT. Informacje o względnej pozycji pociągu uzyskuje się przez wykrywanie bloków ferrytowych rozmieszczonych w segmencie cewki źródłowej. Informacje o położeniu pociągu dostarczane przez komponenty ferrytowe są wykrywane przez pokładowe cewki czujników i detektor. Proponowany ferrytowy system identyfikacji pozycji (FPID) dostarcza dokładnych informacji o położeniu pociągu i jest odporny na zakłócenia elektromagnetyczne WPT. Szczegółowo przedstawiono zasady działania systemu FPID. Wydajność proponowanego systemu FPID mierzono za pomocą symulacji i eksperymentów.



Rys. 7. Konceptyjny schemat blokowy przedstawiający działanie systemu śledzenia położenia pociągu z systemem FPID i segmentacją cewki źródłowej

Fig. 7. Conceptual block diagram showing the operation of the train tracking system with the FPID system and segmentation of the source coil

Źródło: Hwang K., Cho J., Park J. Ferrite Position Identification System Operating With Wireless Power Transfer for Intelligent Train Position Detection, IEEE 2018

Wadą tego systemu w tej postaci jest brak możliwości zidentyfikowania rodzaju składu, można jedynie określić jego dokładną lokalizację na torowisku.

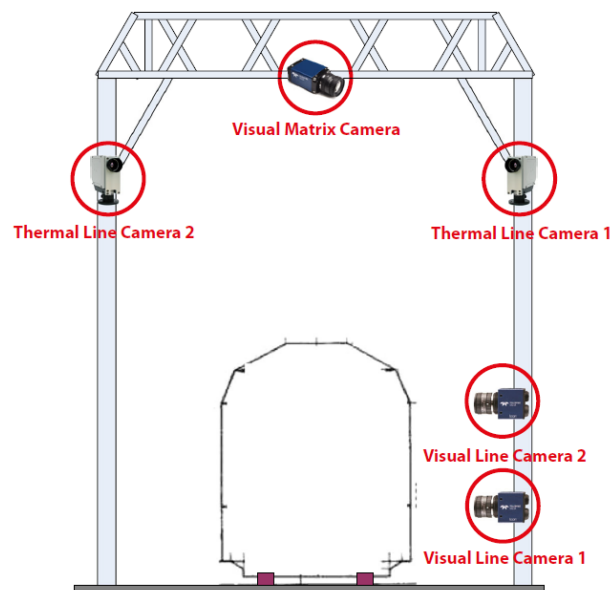
W artykule [27] przedstawiono system wizyjny maszynowy, który skutecznie monitoruje, analizuje i prezentuje dane wizualne pozyskiwane z kolejowej suwnicy wyposażonej w wiele kamer. To rozwiązanie ma na celu poprawę bezpieczeństwa codziennego transportu kolejowego w dwojaki sposób:

- przez oszacowanie wielu wymagań bezpieczeństwa przy użyciu algorytmów analizy obrazu, które mogą przetwarzać duże obrazy pociągów.
- przez pomoc operatorom bezpieczeństwa pociągów w wykrywaniu wszelkich możliwych awarii w pociągu.

System wykorzystuje wysokiej jakości kamery widzialne i termowizyjne, które obserwują pociąg przejeżdżający pod suwnicą kolejową. System wizji maszynowej składa się z trzech zasadniczych modułów:

- systemu automatycznej identyfikacji wagonów, rozpoznającego identyfikator wagonu zgodnie z klasyfikacją UIC wagonów kolejowych,
- systemu wykrywania i lokalizacji pantografu pociągu,
- systemu monitorowania temperatury.

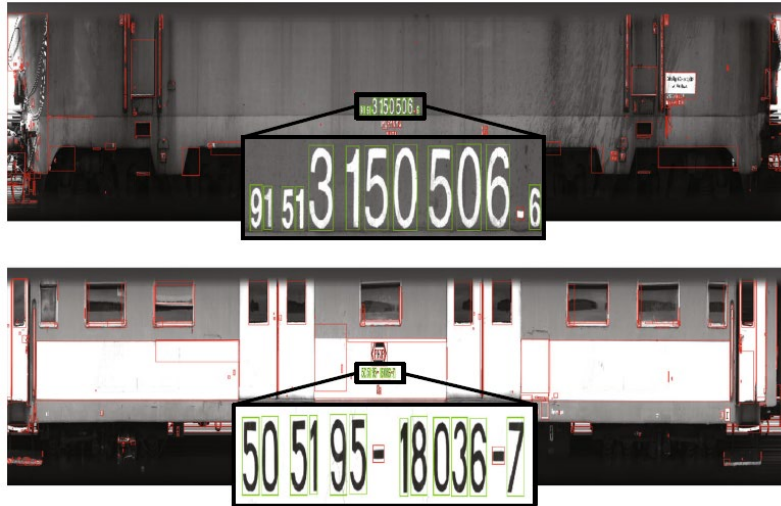
Te trzy moduły widzenia maszynowego przetwarzają sekwencje pociągów wsadowych, a wynikająca z nich analiza jest prezentowana operatorowi za pomocą wielodotkowego interfejsu użytkownika.



Rys. 8. Portal wyposażony we wszystkie kamery. Wizualna kamera matrycowa (HM-640) znajduje się na górze, pośrodku suwnicy, dwie kamery termowizyjne (256L) są umieszczone po obu stronach portalu i dwie wizyjne kamery liniowe (Spyder 4K)

Fig. 8. Portal equipped with all cameras. The visual matrix camera (HM-640) is located at the top in the center of the gantry, two thermal cameras (256L) are placed on either side of the portal, and two line vision cameras (Spyder 4K)

Źródło: Lisanti G., Karman S., Pezadini D, Bimbio A. A multi-camera image processing and visualization system for train safety assessment. Springer Science New York 2017

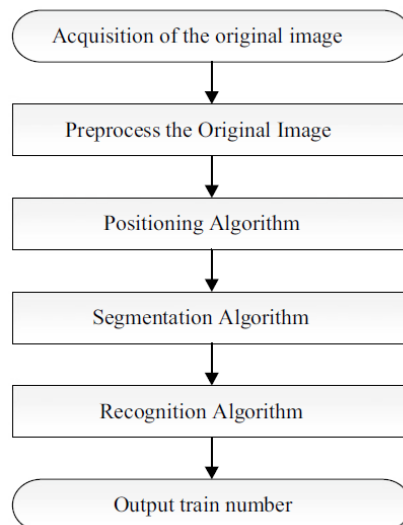


Rys. 9. Przykłady segmentacji obszaru tekstu na dwóch różnych wagonach. Na zielono ramka graniczna podzielona na segmenty po udoskonaleniu RANSAC

Fig. 9. Examples of text area segmentation on two different cars. In green, segmented bounding box after RANSAC refinement

Źródło: Lisanti G., Karman S., Pezadini D, Bimbio A. A multi- camera image processing and visualization system for train safety assessment. Springer Science, New York 2017

Podobny system do tego zastosowanego w niniejszym artykule wykorzystano w [28 i 27], jest on połączeniem systemów ATIS, RFID oraz automatycznego odczytu znaków z pojazdu w celach identyfikacji przez systemy uczenia maszynowego.



Rys. 10. Schemat procesu przetwarzania obrazu dla algorytmu

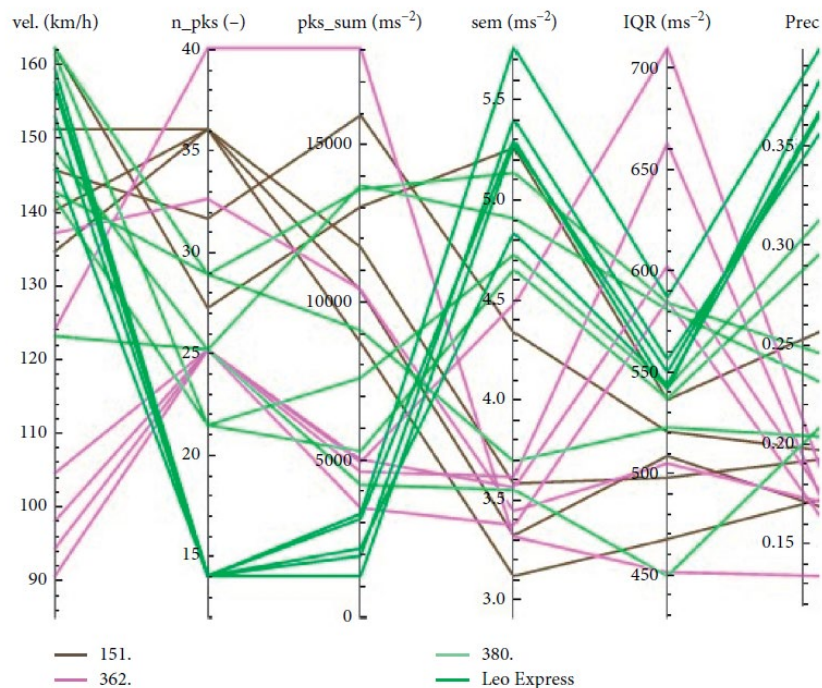
Fig. 10. Diagram of the image processing process for the algorithm

Źródło: Yang Sh., Xu R. Zhou Z. A rail train number identification algorithm based on image processing. Springer Nature, Singapore 2020

W ramach działania przemysłu 4.0 autorzy z Republiki Czeskiej w roku 2020 [29] oraz 2021 [30] przedstawili system identyfikacji pociągów na rozjazdach i przejazdach kolejowych z wykorzystaniem zaawansowanych metod uczenia maszynowego. W artykule [29] autorzy skupili się na identyfikacji lokomotyw elektrycznych czterech typów.

Do opisu przejazdu pociągu wybrano następujące cechy skalarne:

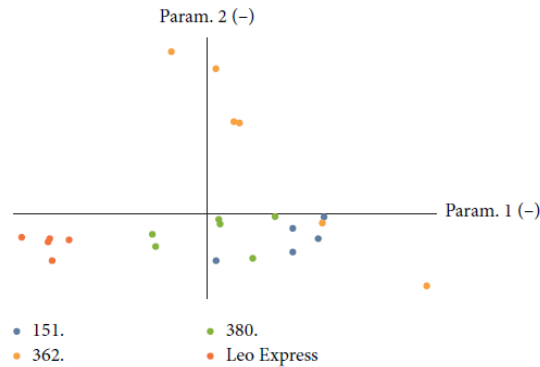
- npiks: liczba pików wykrytych podczas okienkowanej wariancji. Do detekcji użyto funkcji findpeaks języka R. Liczby oznaczają liczbę osi w pociągu;
- suma pików: suma maksymalnych wartości wykrytych n-pików. Do pewnego stopnia wyraża to bezwzględną ilość energii dynamicznej, która jest przekazywana przez podkłady kolejowe;
- sem: proces losowego doboru próby jest opisany przy użyciu błędu standardowego średniej. Zmienność pomiarów jest opisana za pomocą odchylenia standardowego danych próbki. „Sem” jest twierdzeniem probabilistycznym, które opisuje, w jaki sposób wielkość próby, biorąc pod uwagę centralne twierdzenie graniczne, zapewni lepszą granicę oszacowań średniej populacji;
- IQR: rozstęp międzykwartylowy, znany również jako rozrzut środkowy lub środkowe 50% (lub technicznie rozrzut H), jest miarą rozrzutu statystycznego, który jest równy różnicy między górnym i dolnym kwartylem lub między 75. a 25. percentylem. Wartość IQR reprezentuje szerokość pasma energii przekazywanej do podkładu;
- prec: precyzja częstotliwości widma.



Rys. 11. Wizualizacja grupowania cech skalarnych dla poszczególnych przejazdów pociągów posortowanych według typu pociągu

Fig. 11. Visualization of grouping of scalar features for individual train journeys sorted by train type

Źródło: Kratochvilova M., Podrouzek J., Apeltauer J. Train Type Identification at S&C. Hindawi Journal of Advanced Transportation. Volume 2020

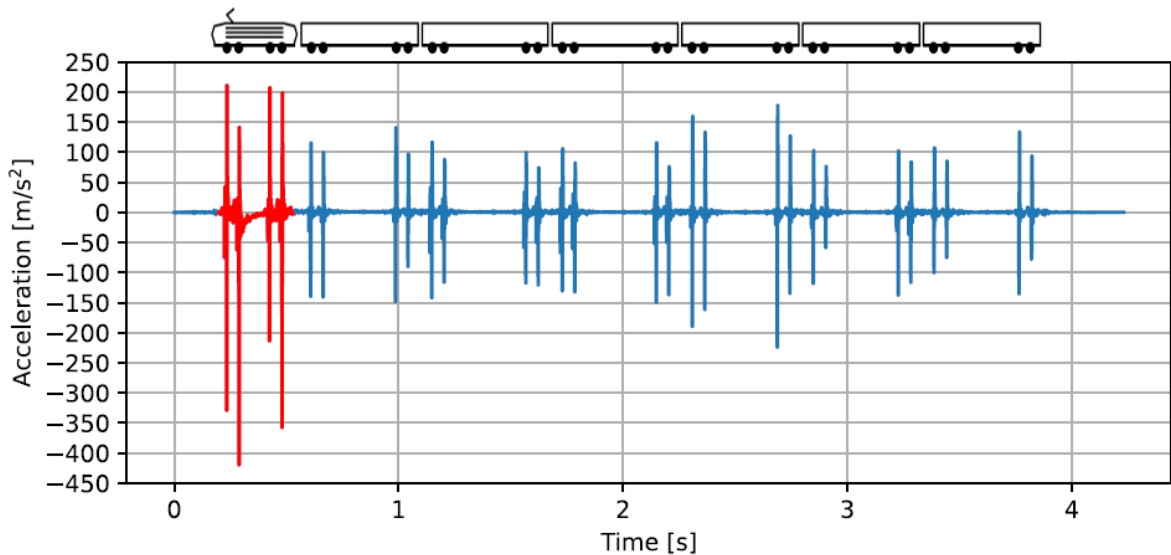


Rys. 12. Wizualizacja grupowania cech skalarnych dla poszczególnych przejazdów kolejowych posortowane według typu pociągu

Fig. 12. Visualization of grouping of scalar features for individual level crossings; sorted by train type

Źródło: Kratochvilova M., Podrouzek J., Apeltauer J. Train Type Identification at S&C. Hindawi Journal of Advanced Transportation. Volume 2020

Z kolei w artykule [30] opisano cyfrowe przetwarzanie sygnału, obejmujące wiele technik, które mają na celu przygotowanie nieprzetworzonych danych zarejestrowanych przez in situ czujniki przyspieszenia do modeli klasyfikacyjnych. Podstawowe przetwarzanie danych obejmuje lokalizację części lokomotywy w sygnale akcelerometru oraz normalizację tego sygnału w kierunkach X i Y, aby zapewnić porównywalności dla różnych prędkości i mas pociągów. Filtrowanie nieprzetworzonych danych w celu zmniejszenia szumu i poprawy dokładności klasyfikacji stanowi kolejną realną opcję, zwłaszcza w przypadku danych o niższej jakości z niedrogich czujników. Omówiono również możliwość kodowania danych szeregów czasowych 1D do obrazów 2D i klasyfikacji za pomocą komputerowych modeli wizyjnych. Ilość przetwarzania wstępnego należy rozważyć w odniesieniu do wybranego modelu klasyfikacji i ograniczeń sprzętowych urządzeń in situ. W pierwszym etapie wyodrębniana jest lokomotywowa część sygnału. Lokomotywy są zwykle lepiej utrzymane niż zwykłe wagony, a także ich parametry, takie jak masa całkowita, rozkład masy czy sztywność zawieszenia, charakteryzują się mniejszą zmiennością. Dlatego lokomotywy są korzystnie wykorzystywane do identyfikacji typów pociągów. Przykładowy sygnał z akcelerometru pokazano na rysunku 13.



Rys. 13. Przykład sygnału akcelerometru generowanego przez pociąg z lokomotywą klasy 380 jadący z prędkością 162 km/h podczas przejazdu przez rozjazd kolejowy

Fig. 13. An example of an accelerometer signal generated by a train with a class 380 locomotive traveling at a speed of 162 km/h while passing through a railway junction

Źródło: Krc R., Podrouzek J. Train Identification System at Railway Switches and Crossing Using Advanced Machine Learning Methods. Brno University of Technology, Brno 2021

Na podstawie przeprowadzonych badań i przejranej literatury autorzy [30] sformułowali następujące podsumowanie:

- Możliwa jest identyfikacja typu pociągu na podstawie danych z akcelerometru mierzonych bezpośrednio w przejazdach i rozjazdach pomimo z natury złożonego zachowania w porównaniu z prostym torem. Możliwe jest również uogólnienie problemu i przeniesienie wstępnie wytrenowanych modeli uczenia maszynowego do różnych lokalizacji.
- Lokomotywowa część sygnału powinna być preferowana zarówno do identyfikacji typu pociągu, jak i do oceny odpowiedzi dynamicznej. Minimalną częstotliwość próbkowania czujników akcelerometru można ustalić na poziomie 4 kHz, aby zapewnić wystarczającą liczbę punktów danych dla ocenianych typów lokomotyw i prędkości do 200 km/h.
- Konwolucyjne sieci neuronowe są zalecaną architekturą bazową. Automatyczne rozpoznawanie wzorców i wyodrębnianie cech prezentowane przez warstwy splotowe umożliwiają przyjęcie kompleksowej strategii uczenia się i zapewniają najnowocześniejszą dokładność klasyfikacji danych szeregów czasowych.
- Walidacja wymagań sprzętowych wykazała możliwość zastosowania wstępnie przeszkolonych modeli do urządzeń in situ. Niedrogi mikrokomputer Raspberry Pi Zero zapewnia wystarczającą pamięć i czasy przetwarzania, pozwalające zlokalizować część lokomotywy na podstawie zmierzonych danych akcelerometru i zidentyfikować jej typ przez klasyfikator uczenia maszynowego.
- Różne strategie klasyfikacji są odpowiednie dla różnych typów zastosowań. Kompleksowe podejście zapewnia wysoką dokładność dzięki zastosowaniu najnowocześniejszych modeli

uczenia maszynowego, takich jak CNN. Podejście oparte na ekstrakcji cech, w połączeniu np. z modelami SVM, może stanowić lepszą opcję monitorowania i planowania konserwacji, ponieważ decyzje podejmowane przez model powinny być zrozumiałe dla zarządców infrastruktury.

- Efekt wstępnego przetwarzania danych należy rozważyć w odniesieniu do zamierzonego zastosowania. Wstępne przetwarzanie danych może być wykorzystywane w połączeniu z niedrogimi czujnikami akcelerometru w celu odsumienia sygnałów i poprawy niezawodności klasyfikatorów.

3. System oparty na pojemności informacyjnej sygnału wibroakustycznego

Autor sformułował nowe cele badawcze jako analizę zsynchronizowanych obrazów wibroakustycznych w aspekcie oceny pojemności informacyjnej zarejestrowanych sygnałów. Wymusiło to zwiększenie zakresu badań i opracowanie nowych planów eksperymentalnych. Opracowano metodę badawczą, której założeniem była synchroniczna rejestracja sygnałów akustycznych w bezpośrednim sąsiedztwie toru oraz drgań w trzech kierunkach rejestrowanych bezpośrednio na szynie. Każdorazowo rejestrowano sygnały analogowe, dzięki czemu możliwa jest analiza przebiegów drgań ciągłych oraz sygnałów ciśnienia akustycznego. Sygnały rejestrowano w środowisku LabVIEW, natomiast analiza odbywała się za pomocą oprogramowania Matlab.

Poniżej przedstawiono schemat postępowania w celu identyfikacji poruszającego się pojazdu przy użyciu metody wibroakustycznej. Podpunkty te podzielono na dziewięć kroków, kolejno:

1. Rejestracja wyników – rejestracja sygnałów w trzech ortogonalnych osiach X, Y, Z wraz z rejestracją hałasu (w przypadku, gdy była taka możliwość).
2. Unifikacja sygnału – zarejestrowane sygnały są następnie unifikowane, tzn. wycinany jest fragment dotyczący samego przejazdu z wycięciem fragmentów dotyczących szumów tła oraz wartości pojawiającej się przed rejestracją, czyli tych związanych z predykcją.
3. Analiza statystyczna sygnału – dokonanie podstawowej analizy (Peak to peak, RMS, Peak Max) oraz utworzenie bazy danych zawierającej te wyniki.
4. Zastosowanie analizy czasowo-częstotliwościowej STFT w celu analizy sygnału w sposób globalny.
5. Analiza falkowa – Wykonanie dwóch analiz Discrete Wavelet Transform (DWT) oraz Empirical Mode Decomposition (EMD) w ustalonych metodach i poziomach.
6. Aktualizacja bazy danych – zaktualizowanie danych z p. 3 o dane z transformat oraz wyników zawierających informacje o Relative Energy [%].
7. Filtracja wyników w celu uzyskania cech charakterystycznych składów.

8. Zebranie wyników – wyznaczenie cech charakterystycznych odróżniających składy kolejowe pod względem pojemności informacyjnej przebiegu drgań i hałasu oraz porównanie sygnałów drganiowych i dźwięku, a także próba wyszukania cech podobieństwa.

4. Wyniki

Zaprezentowano podsumowanie opracowanych wyników metodą analizy falkowej FK (Fejer-Korokvin) ze względu na stały poziom częstotliwości w dekompozycjach (niezmienny dla próbkowania 42 000 Hz występującego w większości dokonanych pomiarów).

W tabeli zaprezentowano wyniki analizy metodą FK. Najważniejszymi jej cechami są:

- próbkowanie 42 000 Hz,
- 8 poziomów dekompozycji + aproksymacja,
- wybór filtra Fejer-Korokvin poziomu 4. analizy falkowej,
- analiza w osi Y,
- wybór punktów pomiarowych „Chełm ST”, „Imielin AD”, „Imielin NO”.

Dla pomiarów punktach „Chełm ST”, „Imielin AD”, „Imielin NO”, „Opole” dokonano pomiarów:

- 11 składów towarowych,
- 7 pojedynczo zarejestrowanych lokomotyw lub drezyn,
- 7 składów EZT,
- 5 składów pośpiesznych.

Tabela 1

Zestawienie energii relatywnej wraz z poziomami po wykonaniu analizy falkowej metodą FK poziomu 4. i przy poziomie dekompozycji 8 dla wszystkich składów. Wyniki średniej wewnętrznej z odrzuceniem 10% i 30%. Kolorem fioletowym zaznaczono najwyższe wartości. Kolorem zielonym wartości dominujące dla składów towarowych.

Oznaczenie T – towarowe, L – pojedyncze składy, E – EZT, P – Pospieszne

Odrzucenie 10%				
Poziomy FK	T	L	E	P
1	1,47	0,82	1,04	0,74
2	5,02	2,97	4,26	2,49
3	10,75	8,59	14,76	7,90
4	21,65	20,61	28,58	21,76
5	16,02	15,11	15,44	49,24
6	7,28	4,39	5,40	10,24
7	6,53	6,78	3,89	2,56
8	6,66	8,58	9,08	0,51
A	24,62	32,14	17,55	4,55

Odrzucenie 30%				
Poziomy FK	T	L	E	P
1	0,87	0,70	0,99	0,74
2	3,50	2,32	4,07	2,49
3	9,71	6,39	14,54	7,90
4	20,54	19,05	29,35	21,76
5	14,39	13,26	12,40	49,24
6	6,86	3,69	4,14	10,24
7	6,12	6,16	2,52	2,56
8	2,92	6,78	5,48	0,51
A	19,12	28,70	12,01	4,55

Źródło: opracowanie własne

Powyższa tabela podsumowuje poziomy FK dla pomiarów drgań dla wszystkich pomiarów. Odrzucenie 30% daje możliwość odrzucenia wyników Tor 2 powodując przekłamanie wyników na korzyść składowych zbliżonych do aproksymacji. Zauważyć można odznaczające się utworzone kategorie z zakresami dominujących składowych ze względu na typ składów, co daje możliwość przypuszczania grup częstotliwościowych charakterystycznych dla danego typu poruszającego się pojazdu. Takimi grupami mogą być wartości od 1080 Hz do 21000 Hz dla składu EZT, wartości 271 Hz-1480 Hz dla składów pospiesznych, wartości od 0 do 370 Hz dla pojazdów pojedynczych oraz prawdopodobnie wartości 1000 Hz-3000 Hz dla składów towarowych. Należy zauważyć, że to zestawienie ma słuszość jedynie w momencie przyrównania nowego typu składu do istniejących ww. podgrup i tylko w konkretnej częstotliwości próbkowania.

5. Podsumowanie

Opracowana metoda daje realne możliwości wykorzystania jej jako dodatkowego lub niezależnego systemu identyfikacji pojazdów szynowych na podstawie sygnałów wibroakustycznych. Tor pomiarowy (do pomiaru drgań) zastosowany w niniejszej pracy umożliwi montaż bezpośrednio do szyjki szyny torowiska, na którym dokonuje się pomiaru metodami nieniszczącymi, natomiast moduł akwizycji danych powinien być zamontowany w bliskiej odległości od akcelerometrów razem z komputerem analizującym wyniki, ale jest możliwość również przekazywania danych telemetrycznie. Pomiar hałasu powinien odbywać się w bliskiej odległości torowiska, natomiast odczyt jest mniej narażony na wpływ toru, po którym porusza się skład (do 2 torowisk).

Opracowano i zweryfikowano metodę identyfikacji pojazdów za pomocą sygnałów wibroakustycznych, gdzie wykorzystano informację z sygnału drganiowego oraz hałasu. Zaproponowano koncepcję toru pomiarowego oraz metod służących identyfikacji sygnałów niestacjonarnych, jakimi są przejazdy pojazdów szynowych. Zweryfikowano i oceniono skuteczność identyfikacji na podstawie zarejestrowanych pomiarów pochodzących z różnych grup pojazdów szynowych w warunkach rzeczywistych dla różnych temperatur otoczenia, jak również różnych punktów pomiarowych. Należy też nadmienić, że rejestracja odbywała się *in vivo* przy pełni funkcjonującej infrastrukturze kolejowej.

Bibliografia

1. Thompson D.: Railway noise and vibration: the use of appropriate models to solve practical problems. In: The 21st International Congress on Sound and Vibration, Beijing, China, 13–17 July 2014 (2014).
2. Lyons R.: Introduction to Digital Signal Processing. WKŁ, Warszawa 2006.
3. Nader M.: Vibrations and noise in transport - selected issues. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (2016).
4. Burdzik R., Konieczny, Ł. Deuzkiewicz, P. Vaskova, I.: Application of time-frequency method for research on influence of locomotive wheel slip on vibration. *J. VibroEng.* 20(8),2998–3008 (2018).
5. Burdzik R., Słowiński P., Juzek M., Nowak B., Rozmus J.: Dependence of damage to the running surface of the railway rail on the vibroacoustic signal of a passing passenger train. *Vibroeng. Procedia* 19, 226–229 (2018).
6. Chromański W.: Simulation and optimization in the dynamics of rail vehicles. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999, s. 141.
7. Gong Ch., Fan W. A new automatic train identification system based on RFID, WISE 2010, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg 2011.
8. Thompson D.J., Jones C.J.C.: A review of the modelling of wheel/rail noise generation. *J. Sound Vib.* 231(3), 519–536 (2000).
9. Durka P.J.: Between time and frequency: elements of contemporary signal analysis. Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, 2004.
10. Cisielski R., Maciąg E.: Road vibrations and their impact on buildings. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990, s. 248.
11. NI Homepage. <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/>. Accessed 08 Feb 2020.
12. Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K., Kłodawski M.: Simulation model of transport system of Poland as a tool for developing sustainable transport. *Arch. Transp.* 31, 23–35 (2014).
13. Siergiejczyk M., Pas J., Rosinski A.: Issue of reliability-exploitation evaluation of electronic transport systems used in the railway environment with consideration of electromagnetic interference. *IET Intel. Transport Syst.* 10(9), 587–593 (2016). Images of Vibrations of a Passing Railway Vehicle 55.

14. Fedorczyk-Cisak M., Furtak M., Gintowt J., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Stypuła, K., Tataro, T.: Thermal and vibration comfort analysis of a nearly zero-energy building in Poland. *Sustainability* 10(10), 3774 (2018).
15. Burdzik R., Nowak B.: Identification of the vibration environment of railway infrastructure. *Procedia Eng.* 187, 556–561 (2017).
16. Nowakowski T., Komorski P., Tomaszewski F.: The efficiency of tram articulations compared to vibroacoustic emissions. *Arch. Transp.* 44, 55–63 (2017).
17. Chilinski B., Zawisza M.: Analysis of bending and angular vibration of the crankshaft with a torsional vibrations damper. *J. VibroEng.* 18(8), 5353–5363 (2016).
18. Burdzik R., Wegrzyn T., Lisiecki A.: Research on influence of fatigue metal damage of the inner race of bearing on vibration in different frequencies. *Arch. Metall. Mater.* 59(4), 1275–1281 (2014).
19. Burdzik R.: Novel method for research on exposure to nonlinear vibration transferred by suspension of vehicle. *Int. J. Non-Linear Mech.* 91, 170–180 (2017).
20. Ortiz J.O., Betancur G.R., Gomez J., et al.: Detection of structural damage and estimation of reliability using a multidimensional monitoring approach. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F, J. Rail Rapid Transit* 232(4), 1021–1032 (2018).
21. Gutierrez-Carvajal R.E., Betancur G.R., Castaneda L.F., et al.: A fractional Fourier transform-based method to detect impacts between the bogie and the car body of a railway vehicle: a data-driven approach. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit* 232(1), 288–296 (2018).
22. Gutierrez-Carvajal R.E., Betancur G.R., Barbosa J., et al.: Full scale fatigue test performer to the bolster beam of a railway vehicle. *Int. J. Interact. Des. Manuf. IJIDEM* 12(1), 253–261 (2018).
23. Sawczuk W., Tomaszewski, F.: Evaluation of the wear of friction pads railway disc brake using selected frequency characteristic of vibrations signal generated by the disc brake. *Diagnostyka* 14(3), 69–74 (2013).
24. Myamlin S., Lingaitis L.P., Dailydka S., Vaičiūnas G., Bogdevičius M., Bureika G.: Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport* 30(1), 88–92 (2015).
25. Jurevičius M., Turla V., Bureika G., Kilikevičius A.: Effect of external excitation on dynamic characteristics of vibration isolating table. *Eksplotacija i Niezawodność* 17(2), 260–265 (2015).
26. Hwang K., Cho J., Park J.: Ferrite Position Identification System Operating With Wireless Power Transfer for Intelligent Train Position Detecion, *IEEE* 2018.
27. Lisanti G., Karman S., Pezatini D., Bimbio A.: A multi- camera image processing and visualization system for train safety assessment. *Springer Science New York* 2017.
28. Yang Sh., Xu R., Zhou Z.: A rail train number identification algorithm based on image processing. *Springer Nature Singapore* 2020.

29. Kratochvilova M., Podrouzek J., Apeltauer J.: Train Type Identification at S&C. Hindawi Journal of Advanced Transportation. Volume 2020.
30. Krc R., Podrouzek J.: Train Identification System at Railway Switches and Crossing Using Advanced Machine Learning Methods. Brno University of Technology, Brno 2021.
31. Ye J., Shi L., He H., Design of Wireless Intelligent Train Identification System Based on GPS/GPRS. IEEE 2009.

SPOSOBY IDENTYFIKACJI POJAZDÓW SZYNOWYCH W ASPEKTCIE WYKORZYSTANIA POJEMNOŚCI INFORMACYJNEJ SYGNAŁÓW WIBROAKUSTYCZNYCH

Streszczenie

Identyfikacja poruszających się pojazdów jest jednym z ważnych zagadnień w dziedzinie diagnostyki i monitorowania ruchu taboru kolejowego oraz poprawy bezpieczeństwa i efektywności transportu kolejowego. Obecnie można zauważyć ciągły rozwój i trend w zakresie poszukiwania nowych źródeł informacji o lokalizacji i składzie pojazdów szynowych znajdujących się w ruchu w sieci transportowej.

W ramach prowadzonych badań opracowano metodę identyfikacji pojazdów z wykorzystaniem sygnałów wibroakustycznych. Zaproponowano metodę pomiaru synchronicznych sygnałów drgań i hałasu generowanych przez poruszający się skład kolejowy. Pozyskiwane w ten sposób sygnały diagnostyczne zawierają szerokie spektrum informacji, jednak należą do grupy sygnałów niestacjonarnych, których zmienność w czasie i częstotliwości utrudnia ich analizę. Opracowano zatem algorytm przetwarzania sygnałów z wykorzystaniem różnorodnych narzędzi analizy matematycznej. Skuteczność opracowanych algorytmów w zakresie identyfikacji rodzaju składu kolejowego prowadzono na podstawie zarejestrowanych sygnałów pochodzących z różnych grup pojazdów szynowych w warunkach rzeczywistych dla różnych temperatur otoczenia, jak również różnych lokalizacji punktów pomiarowych. Zastosowano więc podejście in situ, w którym rejestracja odbywała się w warunkach rzeczywistych przy pełni funkcjonującej infrastrukturze kolejowej.

Otrzymane wyniki umożliwiają wstępną identyfikację i klasyfikację składów kolejowych do przyjętych kategorii. Dalsze badania ukierunkowane będą na pogłębienie analiz w celu zwiększenia liczby kategorii składów kolejowych oraz identyfikacji dodatkowych parametrów jazdy istotnych dla bezpieczeństwa w transporcie kolejowym.

Słowa kluczowe: identyfikacja, wibroakustyka, transport szynowy

WAYS OF IDENTIFYING RAIL VEHICLES IN TERMS OF USING THE INFORMATION CAPACITY OF VIBROACOUSTIC SIGNALS

Abstract

Identification of moving vehicles is one of the important issues in the field of diagnostics and monitoring of rolling stock traffic and improving the safety and efficiency of rail transport. Currently, there is a continuous development and trend in the search for new sources of information about the location and composition of rail vehicles in motion in the transport network.

As part of the research, a method of identifying vehicles using vibroacoustic signals was developed. A method of measuring synchronous vibration and noise signals generated by a moving railway train was proposed. The diagnostic signals obtained in this way contain a wide spectrum of information, but they belong to the group of non-stationary signals whose variability in time and frequency makes their analysis difficult. Therefore, a signal processing algorithm was developed using a variety of mathematical analysis tools. The effectiveness of the developed algorithms in identifying the type of train set was based on registered signals from different groups of rail vehicles in real conditions for different ambient temperatures, as well as different locations of measurement points. Therefore, an in situ approach was used, in which the registration took place in real conditions with a fully functioning railway infrastructure.

The obtained results enable the initial identification and classification of railway trains into the accepted categories. Further research will be focused on deepening the analyzes in order to increase the number of categories of trains and to identify additional driving parameters important for safety in rail transport.

Keywords: identification, vibroacoustics, rail transport

Jakub SZYKOWSKI¹, Magdalena BOROWSKA², Kamila SZYKOWSKA³,
Grzegorz WICIAK⁴

KONCEPCJA WYKORZYSTANIA STAWÓW SŁONECZNYCH JAKO MAGAZYNÓW ENERGII CIEPLNEJ

1. Wstęp

Staw słoneczny to niskotemperaturowy, aktywny system wykorzystania energii słonecznej. Jego celem jest przekształcanie promieniowania słonecznego w energię cieplną przy jednoczesnej jej akumulacji. Podstawową zaletą stawu słonecznego jest zdolność do magazynowania energii cieplnej na długi okres. Warto dodać, że nie jest ona emitowana ze zbiornika nawet nocą ani zimą, jak w typowych zbiornikach wodnych. Nagromadzona w stawie energia cieplna może być później odzyskana np. przez użycie pompy ciepła. Kolejną zaletą stawów solarnych jest możliwość ich stosowania do odsalania wody morskiej. Cechują się one również prostą budową w stosunku do innych magazynów energii. W porównaniu z kolektorami słonecznymi odznaczają się mniejszymi stratami ciepła do otoczenia oraz mają wyższą moc i sprawność. Główne wady to natomiast znacznie większe zużycie wody słodkiej oraz wyższe koszty inwestycji [1, 2].

Stawy słoneczne, to zbiorniki, mogące składać się z kilku warstw, z których wyróżnić możemy trzy główne strefy (rys. 1): powierzchniową (izolującą), pośrednią (buforową) oraz przydenną (akumulacyjną). Charakteryzują się one maksymalnym zasoleniem wody w najniższej warstwie, a minimalnym na ich powierzchni. Spowodowane jest to tym, że wzrost zasolenia wiąże się ze wzrostem gęstości wody. Technologia stawów słonecznych najczęściej wykorzystywana jest w ogrzewnictwie, chłodnictwie, procesach odsalania i suszenia. Oprócz tego, energia pochodząca ze stawu słonecznego może być wykorzystywana do napędzania urządzeń odsalających lub do powierzchniowego oczyszczania wody, np. zasolenia rzek czy

¹ jakuszy805@student.polsl.pl, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska w Gliwicach.

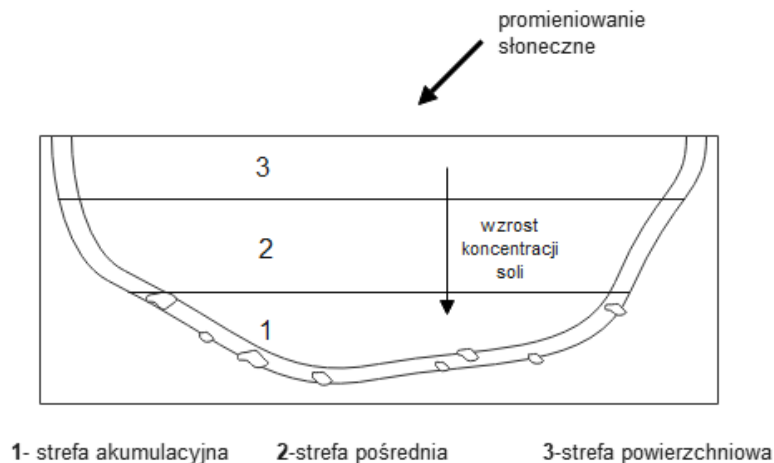
² magdbor222@student.polsl.pl, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska w Gliwicach.

³ Kamila.Szykowska@polsl.pl, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska w Gliwice.

⁴ Grzegorz.Wiciak@polsl.pl, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska w Gliwice.

płynnych odpadów o dużym zasoleniu. Ponadto zmagazynowana w stawie energia cieplna może zostać wykorzystana do wytworzenia energii elektrycznej przez obieg Rankine'a lub energii mechanicznej przez silnik Stirlinga. Przydatna może być także jako ciepło do szklarni lub innych budynków wykorzystywanych w rolnictwie o niskim zapotrzebowaniu na energię cieplną. Dodatkowo, jeśli staw zlokalizowany zostanie od strony południowej budynku, zwiększy jednocześnie jego naturalne oświetlenie [3].

Schemat poglądowy klasycznego stawu słonecznego został przedstawiony na rys. 1. Warstwa powierzchniowa charakteryzuje się najmniejszym stężeniem solanki oraz najniższą temperaturą w całej grubości warstwy. Następuje tu wymiana ciepła z otoczeniem przez konwekcję oraz parowanie wody. W warstwie pośredniej wraz ze wzrostem głębokości następuje stopniowy przyrost stężenia oraz temperatury. Warstwa ta przepuszcza promieniowanie słoneczne do warstwy przydennej. Poza tym izoluje dwie skrajne warstwy i zapobiega mieszaniu się wody. Warstwa akumulacyjna odznacza się największym zasoleniem oraz gęstością. Akumuluje ciepło, które przenika przez górne warstwy. Podgrzana solanka ma gęstość większą od gęstości wody, więc utrzymuje się na dnie. Grubość warstwy jest ściśle związana z ilością zmagazynowanego ciepła, które może być odebrane w ciągu sezonu, oraz wartością zasolenia [4].



Rys. 1. Schemat klasycznego stawu słonecznego

Fig. 1. Diagram of a classic solar pond

Źródło: opracowanie własne

W naturalnych stawach lub jeziorach woda ogrzewana przez promienie słoneczne jest lżejsza i unosi się do górnych warstw oraz schładza się w kontakcie z powietrzem. W stawach słonecznych energia jest akumulowana dzięki dużemu stężeniu soli w wodzie w postaci solanki. Chroni ona przed zamarzaniem, zapobiega powstawaniu w zbiorniku konwekcji oraz rozwojowi glonów. Pozyskiwanie ciepła ze strefy przydennej (magazynującej) może następować przez wymienniki ciepła ułożone na dnie zbiornika lub przez wymienniki znajdujące się poza zbiornikiem. W celu zwiększenia efektywności systemu coraz częściej wykorzystuje się pompy ciepła [5].

2. Przykłady aplikacji technologii stawów słonecznych

Magazynowanie energii z wykorzystaniem stawów słonecznych w ostatnim czasie budzi coraz większe zainteresowanie. Nie oznacza to jednak, że technologia ta odkryta została dopiero niedawno. W rzeczywistości stawy słoneczne znane są już od wielu lat. Na przełomie lat 70. i 80. XX w. w izraelskiej osadzie Beit HaArava zbudowano największy na świecie staw solarny do wytwarzania energii elektrycznej. Miał on powierzchnię aż 210 000 m² i generował moc elektryczną o wartości 5 MW (rys. 2). Był w użyciu do 1988 roku [6, 7].



Rys. 2. Staw słoneczny Beit HaArava

Fig. 2. Beit HaArava solar pond

Źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Ponds_at_Beit_Ha%27arava.jpg [dostęp: 30.12.2022]

Kolejnym przykładem wykorzystania tej technologii magazynowania energii może być również projekt badawczo-rozwojowy przeprowadzony przez University of Texas w El Paso, zainicjowany w 1983 roku. Wybudowany w tym mieście staw słoneczny miał powierzchnię 3000 m² i głębokość 3,2 metra (rys. 3). Już w 1985 roku jako pierwszy staw na świecie dostarczał energię cieplną do producentów przemysłowych. Z kolei w 1986 roku jako pierwszy w Stanach Zjednoczonych miał zdolność do wytwarzania energii elektrycznej, natomiast już rok później stał się pierwszym w kraju eksperymentalnym zakładem do odsalania wody, zasilanym energią słoneczną. Obecnie badania w El Paso koncentrują się na technologiach zarządzania solanką. Długoterminowym celem tych badań jest opracowanie nowatorskiego systemu, dzięki któremu możliwe będzie odpowiednie zarządzanie solanką przez odsalanie wieloprotocowe połączone ze stawami słonecznymi [8].



Rys. 3. Staw słoneczny w El Paso

Fig. 3. Solar pond in El Paso

Źródło: Abu-Eishah S.: Economic Feasibility of Salinity-Gradient Solar Ponds (SGSP) for Production of Fresh Water and Pure Salt(s) from Saline and Hypersaline Waters, November 2011.

Z kolei pierwszym krajem azjatyckim, który zdecydował się na zbudowanie stawu słonecznego, były Indie. Nastąpiło to w latach 1987-1993. Staw (rys. 4) o powierzchni 6000 m² zbudowany został w jednym z najbardziej uprzemysłowionych regionów tego kraju – Gudżarat. Był on wykorzystywany do dostarczania gorącej wody do mleczarni. Funkcjonował bezproblemowo do 2000 roku, gdy silne trzęsienie ziemi spowodowało, że mleczarnia została zamknięta [9].

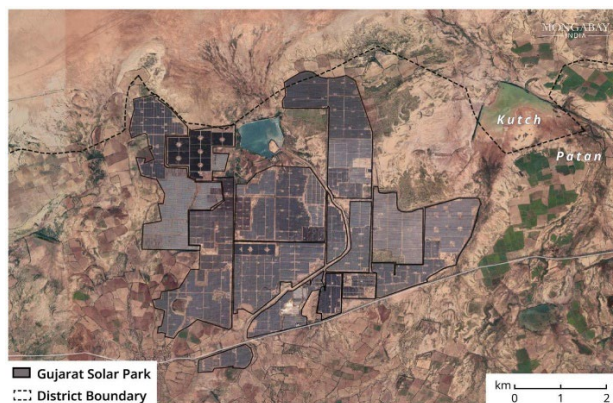


Rys. 4. Staw słoneczny w Gudżarat

Fig. 4. Solar pond in Gujarat

Źródło: Jebbar A., Mahdi J.: Theoretical Investigation of Using a Solar Pond for Air Conditioning of Buildings in Karbala City, January 2020

Obecnie w stanie Gudżarat znajduje się największy na świecie park solarny o powierzchni ponad 2000 hektarów. Rysunek 5 obrazuje zdjęcie satelitarne parku. Został on uruchomiony w 2010 roku, a oddany do użytku rok później. Obecnie na terenie parku rozmieszczonych jest 36 firm produkujących 730 MW energii słonecznej, a realizowane są dalsze projekty zwiększające produkcję o kolejne 20 MW [10].



Rys. 5. Park solarny w Gudżarat

Fig. 5. Solar park in Gujarat

Źródło: <https://india.mongabay.com/2022/03/a-decade-on-indias-first-solar-park-has-many-promises-left-to-fulfil/> [dostęp: 30.01.2023]

3. Aspekty techniczne i technologiczne przy budowie stawów słonecznych

Parametry, na które trzeba zwracać największą uwagę w celu zapewnienia płynnej konfiguracji i działania stawu słonecznego, to głównie: nieskomplikowany sposób zaopatrzenia w wodę do tworzenia stawu z płukaniem zewnętrznym, jak również wiatr o mniejszej prędkości, aby zmniejszyć mieszanie się między trzema strefami stawu oraz aby unoszone przez wiatr pozostałości utrzymały czystość. Do poprawy wydajności stawu słonecznego służą przegrody i system izolacji powierzchni o strukturze plastra miodu [11, 12].

Najważniejszymi cechami przy doborze soli są szybkość dyfuzji oraz temperatura rozpuszczalności soli w wodzie. Wysoka wartość rozpuszczalności pozwala na wyższe stężenia w roztworze. Rozpuszczalność nie może zmieniać się znacząco wraz ze zmianą temperatury. Oprócz tego istnieją również przyczyny praktyczne, takie jak koszt, dostępność dla służb obsługi i zanieczyszczenie środowiska. Substancja rozpuszczona w wodzie powinna być wystarczająco przejrzysta dla promieniotwórczości słonecznej oraz przyjazna dla środowiska. Ważne także, aby była dostępna w wystarczającej ilości w pobliżu stawu słonecznego. Całkowity koszt dostaw powinien być niski, a sól powinna być dostępna w pobliżu stawu, aby obniżyć koszty [13, 14, 15].

Ważna jest również kwestia zaopatrzenia w wodę, która jest wymagana podczas tworzenia stawu słonecznego. Wodę wykorzystuje się do napełnienia i założenia zbiornika, uzupełnienia ubytków na skutek parowania i mycia powierzchni. Na etapie projektowania uwzględnia się dostępność wody, koszty i potrzeby w zakresie pompowania, w tym długoterminową trwałość źródeł dostaw wody [16, 17].

Bardzo ważnym aspektem przy budowie stawów słonecznych jest ich położenie. Dąży się do tego, aby nakłady inwestycyjne były jak najmniejsze. Środowisko w zakresie danych klimatycznych i geologicznych jest niezbędnym czynnikiem decydującym o wyborze

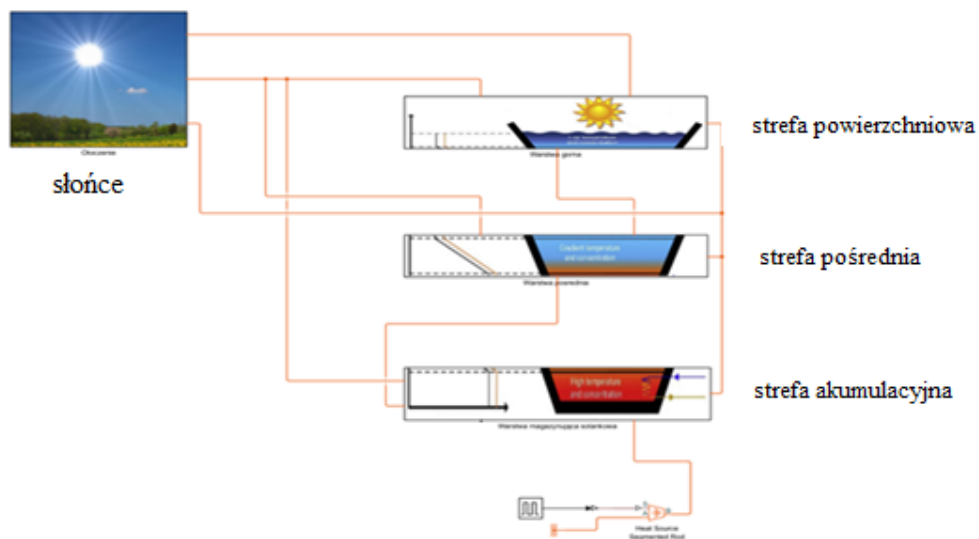
lokalizacji. Równie ważna jest kwestia zapewnienia wystarczającej ilości światła słonecznego w poszczególnych porach roku [18].

Straty ciepła ze stawu są nieuniknione, ale łatwe do zredukowania. Wpływają one pośrednio na wydajność stawu słonecznego. Ciepło oddawane jest do otoczenia poprzez ściany i dno stawu oraz jego część zostanie wchłonięta przez materiał na dnie. Aby zapobiec oddawaniu ciepła do otoczenia przez ściany, najkorzystniejszym kształtem stawu jest okrąg. Ze względu jednak na trudności konstrukcyjne i koszty stawu często przybierają kształty wieloboków [19, 20].

4. Projekt koncepcyjny modelowego stawu słonecznego

W związku z występującymi na świecie problemami z magazynowaniem energii odnawialnej zdecydowano się podjąć badania w tematyce stawów słonecznych jako magazynów energii słonecznej. Celem podjętych badań jest zbadanie możliwości wykorzystania technologii stawów słonecznych do magazynowania energii i jej późniejszego wykorzystania w różnych sektorach gospodarki oraz przemysłu.

Pierwszym etapem projektu było stworzenie modelu stawu solarnego w środowisku MATLAB (SIMULINK) o parametrach zbliżonych do rzeczywistych stawów solarnych i tworzono równocześnie stanowiska pomiarowe modelu stawu słonecznego. Bazowy model stawu słonecznego został zaprezentowany na rys. 6. Składa on się z: modelu otoczenia, trzech warstw o różniącym się stopniu zasolenia i różnym położeniu (dalej lub bliżej słońca) oraz bloków scope wyświetlających zależności temperatury i mocy poszczególnych składowych modelu od czasu.



Rys. 6. Model stawu słonecznego w środowisku MATLAB SIMULINK

Fig. 6. Solar pond model in MATLAB SIMULINK environment

Źródło: opracowanie własne

Wstępne analizy zostały przeprowadzone dla dwóch dób (48 godzin). Przyjęto, że światło słoneczne będzie dostarczane do stanowiska przez 12 godzin, od 8:00 do 20:00 (w oba dni). Modelowany staw w programie Matlab Simulink miał powierzchnię 9 m². Pomiaru były zapisywane co 10 minut.

Moc cieplna dotyczy jedynie warstwy magazynującej i została wyznaczona ze wzoru:

$$Q_j = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

gdzie:

Q_j – moc cieplna [J],

m – masa wody około 3,2 kg,

c – ciepło właściwe wody 4200 J/kg·K,

ΔT – różnica między temperaturą początkową, a temperaturą w danym punkcie pomiarowym.

Proces był prowadzony w czasie, więc ciepło całkowite było obliczane ze wzoru:

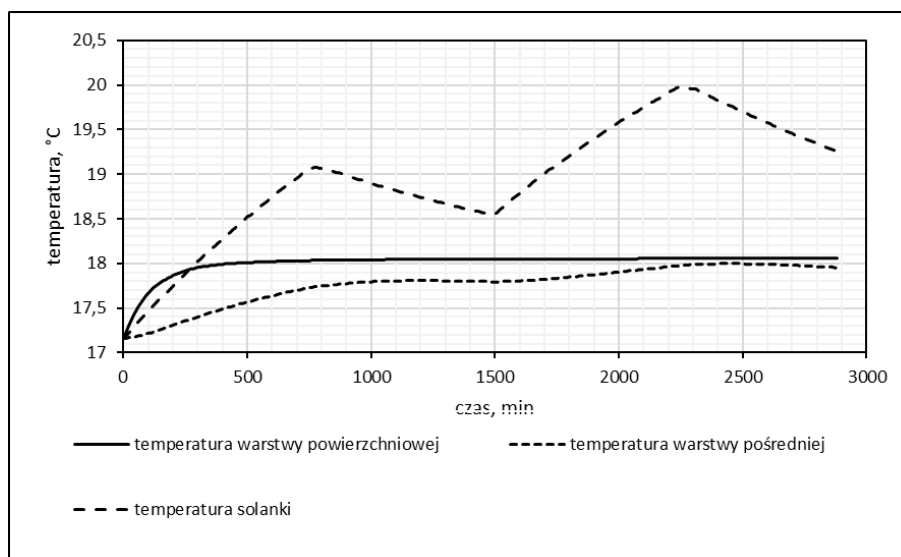
$$Q = \frac{Q_j}{\tau} \quad (2)$$

gdzie:

τ – czas trwania pomiarów.

Pozyskane dane z modelu zostały zobrazowane na wykresach na rys. 7-9.

Na rys. 7 została przedstawiona temperatura mierzona w każdej warstwie w czasie 48 godzin. Temperatura warstwy powierzchniowej i warstwy pośredniej na początku rośnie, a następnie stabilizuje się na poziomie 18°C. Temperatura solanki rośnie w czasie działania światła słonecznego, a następnie po jego ustaniu spada. Cykl ten jest analogiczny w przypadku obu dób.

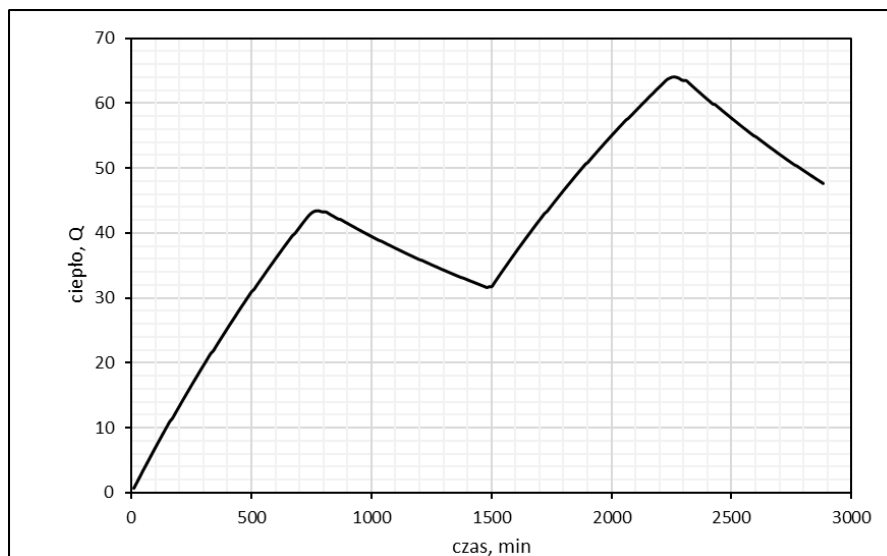


Rys. 7. Temperatura mierzona w każdej warstwie w czasie 48 godzin

Fig. 7. Temperature measured in each layer over 48 hours

Źródło: opracowanie własne

Suma ciepła wygenerowanego w czasie 48 godzin została przedstawiona na rys. 8. W czasie 48 godzin ilość ciepła wygenerowanego ze stawu słonecznego wyniosła 47,64 W.

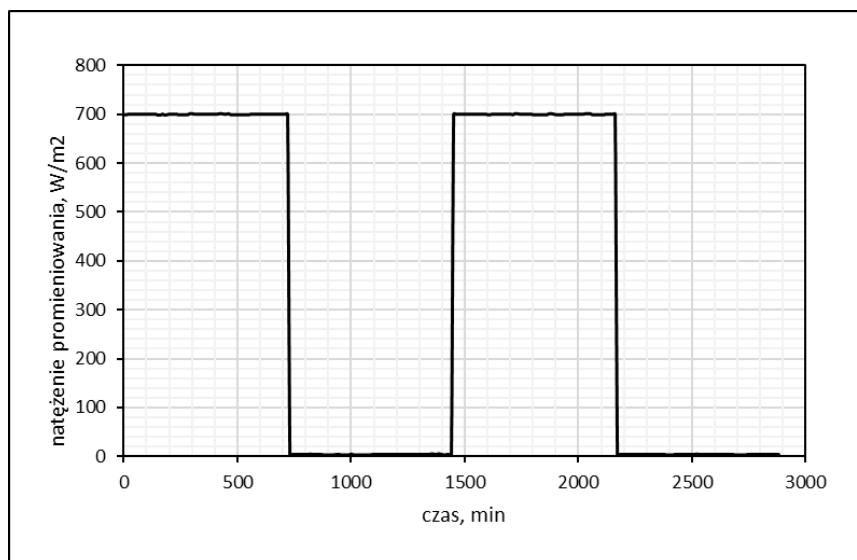


Rys. 8. Suma ciepła wygenerowanego w czasie 48 godzin

Fig. 8. Sum of heat generated in 48 hours

Źródło: opracowanie własne

Rysunek 9 przedstawia natężenie promieniowania w czasie 48 godzin. W czasie trwania symulacji natężenie było stałe i po uwzględnieniu strat przyjęto je na poziomie 700 W/m^2 w czasie działania promieniowania słonecznego. Obrazuje to warunki w słoneczny letni dzień przy małym zachmurzeniu [21].



Rys. 9. Natężenie promieniowania w czasie 48 godzin

Fig. 9. Radiation intensity over 48 hours

Źródło: opracowanie własne

5. Podsumowanie

W niniejszym artykule omówiono zagadnienia dotyczące ogólnej tematyki stawów słonecznych, a także przedstawiono zamodelowany staw słoneczny. Jest to technologia, która staje się coraz popularniejsza, niemniej nadal wymaga wielu badań oraz rozwoju, m.in. w celu sprostania wyzwaniom oraz ograniczeniom, z którymi trzeba się zmierzyć przy jej budowie. Na świecie trwają intensywne prace nad zminimalizowaniem strat cieplnych, lepszym sposobem magazynowania ciepła i energii elektrycznej oraz sposobami utrzymania odpowiedniego poziomu zasolenia stawów. Pojawia się coraz więcej nowych technologii wykorzystania zmagazynowanego w stawach ciepła. Technologia ta wciąż się rozwija, co związane jest z całą pewnością z rosnącym zapotrzebowaniem na energię. Wyniki uzyskane z modelowanego stawu słonecznego posłużą jako porównanie z wynikami, które uzyskane będą na tworzonym stanowisku pomiarowym stawu słonecznego.

Badania przeprowadzone w ramach finansowania kształcenia zorientowanego projektowo – PBL, w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, projektu pt. *Zaawansowane badania w zakresie wykorzystania wód solankowych na terenach przemysłowych i pokopalnianych w technologii stawów słonecznych.*

Bibliografia

1. <https://fotowoltaikatotu.pl/staw-sloneczny/> [dostęp: 26.01.2023].
2. <https://swiatoze.pl/staw-sloneczny-jako-sposob-termicznego-magazynowania-energii/> [dostęp: 26.03.2023].
3. <http://www.jak-budowac.pl/stawy-sloneczne-do-wykorzystywania-energii-slonecznej> [dostęp: 22.03.2023].
4. <https://projekt-energie.eu/pl/platforma-edukacyjna/article-aktywne-systemy-wykorzystania-energii-slonecznej-stawy-sloneczne-czesc-2.html> [dostęp: 04.04.2023].
5. <https://www.cire.pl/artykuly/materialy-problemowe/119630-magazynowanie-ciepła-rodzaje-magazynów> [dostęp: 5.04.2023].
6. Tabor H.Z., Doron B.: The Beit Haarava 5 MWe solar pond power plant progress report, 1990.
7. Nielson C., Akbarzede A., Andrews J., Becerra H.R.L., Golding P., The History of Solar Pond Science & Technology, Proceedings of the International Solar Energy Society, 2005.
8. Lu H., Swift A.H.P.: El Paso Solar Pond. ASME. J. Sol. Energy Eng. August 2001.
9. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Ponds_at_Beit_Ha%27arava.jpg [dostęp: 30.12.2022].

10. <https://india.mongabay.com/2022/03/a-decade-on-indias-first-solar-park-has-many-promises-left-to-fulfil/> [dostęp: 30.01.2023].
11. Nielsen C., Akbarzadeh A., Andrews J. et al.: The history of solar pond science and technology. Proceedings of the 2005 Solar World Conference, Orlando, FL, August 6-12, 2005.
12. Verma S., Das R.: Concept of triple heat exchanger assisted solar pond through an improved analytical model. *J. Sol. Energy Eng., Trans. ASME*, 141 (5), 051003 (1-12), 2019a.
13. Das R., Ganguly S.: A comprehensive review on solar pond research in India: Past, present and future. *Solar Energy* 247 (2022) 55-72.
14. Srinivasan J.: Solar pond technology, *Sadhana*, vol. 18, no. 1, 1993, pp. 39-55.
15. Ines M. et al.: Experimental studies on the effect of using phase change material in a salinity-gradient solar pond under a solar simulator. *Solar Energy* 186 (2019), pp. 335- 346.
16. Aizaz A., Yousaf R.: Construction and Analysis of a Salt Gradient Solar Pond for Hot Water Supply. *Euro. Sci. J.* 9, 36, 2013.
17. Fagehaa H., Bawahaba M., Veta Q et al.: An experimental study to establish a salt gradient solar pond (SGSP). 2nd International Conference on Energy and Power, 2018.
18. Velmurugana V., Sritharb K.: Prospects and scopes of solar pond: A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 2008, 2253-2263.
19. <https://pl.sourcknowledge.com/solar-pond> [dostęp: 22.01.2023].
20. <https://corab.pl/aktualnosci/jak-obliczyc-przewidywane-roczne-zuzycie-pradu-w-domu> [dostęp: 22.11.2022].
21. <https://kospel.pl/blog/ile-energii-slonecznej-mozna-uzyskac-ze-slonca-na-obszarze-polski-b57.html> [dostęp: 4.04.2023].

KONCEPCJA WYKORZYSTANIA STAWÓW SŁONECZNYCH JAKO MAGAZYNÓW ENERGII CIEPLNEJ

Streszczenie

W artykule przedstawiona została tematyka magazynowania energii cieplnej z wykorzystaniem technologii stawów słonecznych. Stawy słoneczne to niskotemperaturowe zbiorniki wodne, które przekształcają promieniowanie słoneczne w energię cieplną. Podstawową zaletą takiego rozwiązania jest ekologiczny i ekonomiczny sposób magazynowania ciepła przez długi czas. Energia zmagazynowana w stawie może być odzyskana za pomocą pompy ciepła i użyta np. do ogrzewania pomieszczeń, wytwarzania

energii elektrycznej i mechanicznej lub napędzania urządzeń odsalających wodę. W ramach wstępnych analiz zamodelowano pracę stawu słonecznego w programie Matlab. Uzyskane w ten sposób wyniki będą podstawą do dalszych badań przeprowadzanych w przyszłości na stanowisku laboratoryjnym.

Słowa kluczowe: staw słoneczny, magazynowanie energii, energia słoneczna

THE CONCEPT OF USING SOLAR PONDS AS THERMAL ENERGY STORAGE

Abstract

The article presents the subject of thermal energy storage with the use of solar pond technology. Solar ponds are low-temperature water reservoirs that convert solar radiation into thermal energy. The main advantage of such a solution is an ecological and economical way of storing heat for a long time. The energy stored in the pond can be recovered by means of a heat pump and used, for example, to heat rooms, generate electrical and mechanical energy or drive water desalination devices. As part of the preliminary analysis, the work of the solar pond was modeled in the Matlab program. The results obtained in this way will be the basis for further research carried out in the laboratory in the future.

Keywords: solar pond, energy storage, solar energy

Sławomir TOPÓR¹

WPLYW METODY SPAWANIA NA ROZKŁAD TEMPERATUR SPAWANYCH RUR STALOWYCH Z WYKŁADKAMI KOMPOZYTOWYMI

1. Wstęp

Materiałom inżynierskim stawiane są coraz to wyższe wymagania, od wytwarzanych wyrobów wymaga się jednocześnie wysokich własności mechanicznych, w tym między innymi odporności na ścieranie oraz odporności na działanie agresywnych środowisk korozyjnych. Wymagania te stawiane są wyrobom pracującym w temperaturze otoczenia i w podwyższonych temperaturach.

W przypadku transportu pneumatycznego lub hydraulicznego materiałów sypkich rurociągami występuje istotny problem z materiałami wykonanych rur oraz ich łączeniem. Poszczególne elementy rurociągów należy ze sobą połączyć, uzyskując szczelność połączenia oraz odpowiednią jego wytrzymałość. W przypadku rurociągów stalowych podstawowymi metodami łączenia są połączenia skręcane lub spawane. Alternatywnym rozwiązaniem dla rurociągów stalowych jest stosowanie rurociągów stalowych z wykładkami kompozytowymi, które wykazują dużo wyższą odporność na ścieranie i agresywne środowiska korozyjne, będąc jednocześnie neutralnymi dla transportowanego medium. Dla każdego transportowanego materiału opracowywana jest indywidualna unikatowa mieszanka składu chemicznego materiału kompozytowego wykładki, która jest dostosowana do stawianych im wymagań zależnych między innymi od ziarnistości, twardości, kształtu, temperatury, składu chemicznego transportowanego materiału oraz prędkości przepływu, ilości i regularności przepływu transportowanego materiału. Gdy stosuje się nieodpowiednie rozwiązania, np. dobiera się nieodpowiedni materiał kompozytowy lub wykonuje się niewłaściwe połączenia pomiędzy kolejnymi odcinkami rur, może dojść do uszkodzenia materiału kompozytowego, odspojenia go od materiału rury, skutkiem czego jest gwałtowna degradacja materiału rury, co powoduje niekontrolowaną awarię systemu transportowego.

¹ slawomir.topor@polsl.pl, Katedra Spawalnictwa, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska.

Rurociągi zawierające nowoczesne wykładki kompozytowe są łączone przez skręcanie kołnierzy, które występują na obu końcach rur, lub przez wcześniejsze przyspawanie pośrednich tulei i pierścieni, co przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Te rozwiązania są kosztowniejsze niż połączenie spawane doczołowe, natomiast ze względów technologicznych do tej pory nie opracowano technologii spawania rur zawierających wykładki kompozytowe [1–8].



Rys. 1. Łączone przez skręcenie stalowe rury z wykładkami kompozytowymi
Fig. 1. Steel pipes with composite liner joined by twisting
Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Rurociągi stalowe z wykładkami kompozytowymi łączone przez spawanie pośrednich tulei i pierścieni
Fig. 2. Steel pipes with composite liners joined by welding of intermediate sleeves and rings
Źródło: opracowanie własne

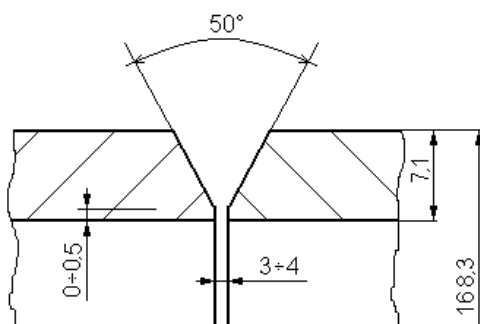
2. Wytwarzanie i spawanie rur z wykładkami kompozytowymi

Celem obniżenia masy wytwarzanych rur, które pierwotnie miały dospawane kołnierze dostosowane do połączeń skręcanych lub dospawane tuleje i pierścienie przeznaczone do spawania montażowego, jest opracowanie technologii spawania doczołowego montażowego rur z wykładkami kompozytowymi. Opracowanie technologii wytwarzania prefabrykatów takich rur jest mniej czasochłonne i pracochłonne, jednak problem pojawia się podczas spawania montażowego rur zawierających wykładki kompozytowe ze względu na wrażliwość materiału kompozytu na wysokie temperatury. Próby spawania przeprowadzono dla różnych metod spawania, stosując również różne techniki spawania. Przebadano kilka

rozwiązań dla wyżej stawianych założeń. Porównano ze sobą spawanie TIG (metoda 141), elektrodą otuloną MMA (metoda 111) oraz MAG, wykonując przetop w różnych pozycjach spawania – PH i PJ (metoda 135) [9].

3. Próbki do spawania

Zestawy próbek składały się z rur ze stali P355NH TC2 o średnicy \varnothing 168,3 mm i grubości ścianek 7,1 mm. Złącza zostały przygotowane do spawania zgodnie z normą PN-EN ISO 9692-1 [10, 11]. Próbki zostały przygotowane na V, gdzie kąt ukosowania rur wynosił 60° , próg $0 \pm 0,5$ mm, a szczelina spawalnicza 3 ± 4 mm. Sposób przygotowania rowka spawalniczego został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Przygotowania krawędzi rur do spawania

Fig. 3. Preparing the edges of pipes for welding

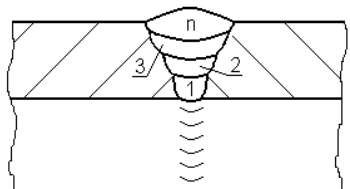
Źródło: opracowanie własne

Do badania technologii spawania przygotowano zestawy próbek rur bez wykładek kompozytowych. Na wewnętrznych ich stronach w rejonie spawanych krawędzi zamocowano termopary laboratoryjne w celu dokonania rejestru temperatury nagrzewania podczas spawania i chłodzenia po spawaniu. Termopary były zlokalizowane w połowie wysokości rury, po jej obu stronach, po dwa zestawy termopar na stronę. Rejestrowanie temperatur odbywało przy użyciu urządzenia Agilent 39470A, zastosowano termopary typu K (NiCr-Ni) Klasy 1 według PN-EN 60584-1 o wymiarach $2 \times 0,20$ mm i izolacji GLGL (włókno szklane/włókno szklane) [12].

4. Spawanie – założenia

Spawanie rur będzie wykonywane w miejscach docelowych, tj. w miejscach instalowania rurociągów, np. w wykopach, na otwartych przestrzeniach, lub na dużych wysokościach, gdzie będą narażone na wpływ warunków atmosferycznych, takich jak wiatr czy opady atmosferyczne. Dla porównania wybrano trzy metody spawania łukowego: 111, 135, 141, jako

najbardziej dostosowane metody do spawania montażowego, mając na uwadze zapewnienie odpowiedniego stanowiska do spawania pozwalającego na uzyskanie odpowiednich warunków do spawania. Dla wszystkich metod założono spawanie w pozycji PH z dołu do góry, natomiast dla metody 135 dodatkowo przewidziano wykonanie próbek spawanych pierwszym ściegiem w pozycji PJ z góry na dół. Schemat układania ściegów spoin przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat układania ściegów spoin

Fig. 4. Schema of welding sequence

Źródło: opracowanie własne

5. Spawanie próbek oraz badania nieniszczące

Wykonano cztery zestawy próbek. Temperatura otoczenia wynosiła 20°C, podobną temperaturę miały spawane próbki. Temperatura międzyściegowa wynosiła 65°C. Wszystkie próbki zostały poddane badaniom wizualnym penetracyjnym, magnetyczno-proszkowym i ultradźwiękowym.

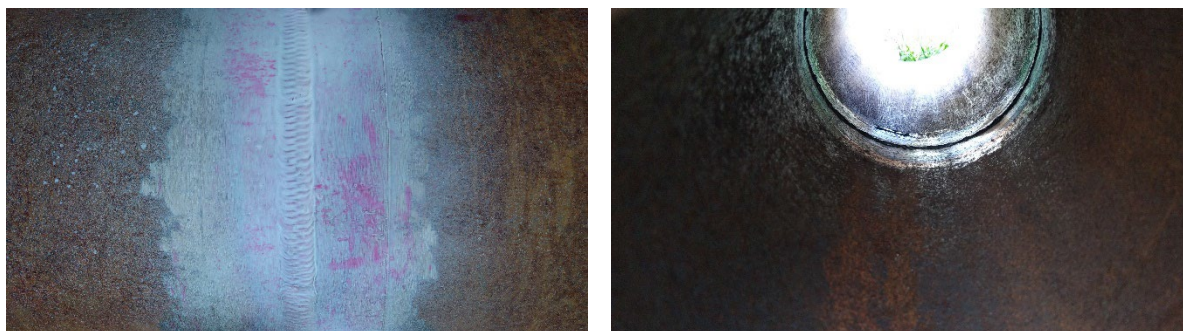
Pierwszy zestaw próbek był spawany metodą 141. Jako materiał dodatkowy do spawania zastosowano pręt lity WMoSi wg PN-EN ISO 21952-A o średnicy \varnothing 2,4 mm [13]. Do spawania wykorzystano elektrodę wolframową WT20 wg PN-EN ISO 6848 o średnicy \varnothing 2,4 mm [14]. Zużycie gazu osłonowego I1 wg PN-EN ISO 14175 wynosiło 8÷12 (l/min) [15]. Parametry spawania przedstawiono w tabeli 1. Na rysunku 5a przedstawiono widok spoiny od strony lica po badaniu penetracyjnym, natomiast na 5b pokazano widok od strony grani.

Tabela 1

Parametry spawania dla pierwszego zestawu próbek (141)

Nr ściegu	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Szybkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	96÷100	11÷13	= (-)	27	0,14÷0,17
2	126÷127	12÷14	= (-)	16	0,34÷0,40
3	127÷131	12÷14	= (-)	13	0,42÷0,50
4-n	128÷132	13÷14,5	= (-)	16	0,37÷0,43

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Widok spoiny wykonanej metodą 141: a) od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym, b) od strony grani

Fig. 5. View of the weld made using the 141 method: a) from the face side of the weld after penetrant testing, b) from the root side

Źródło: opracowanie własne

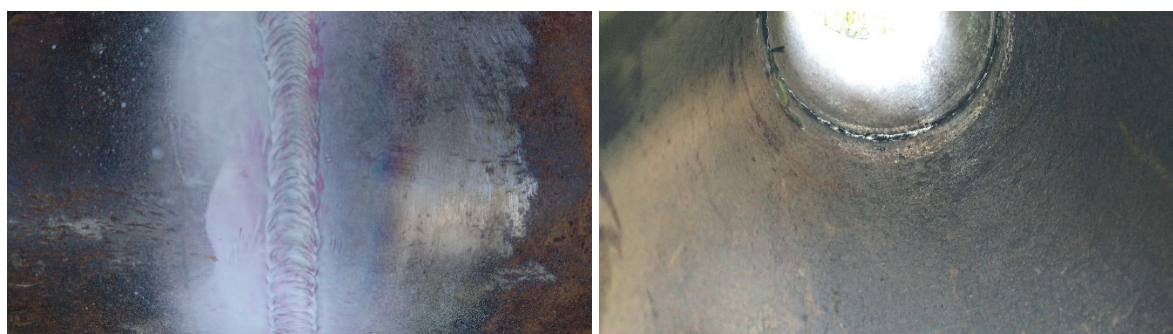
Drugi zestaw próbek wykonano metodą 111. Jako materiał dodatkowy do spawania zastosowano elektrody zasadowe E38 3 B42 wg PN-EN ISO 2560 o średnicy \varnothing 2,5 mm, które były suszone zgodnie z zaleceniami producenta [16]. Dla drugiego zestawu próbek zastosowano parametry spawania jak w tabeli 2. Widok spoiny od strony lica i grani po badaniu penetracyjnym przedstawiono na rysunku 6a i 6b.

Tabela 2

Parametry spawania dla drugiego zestawu próbek (111)

Nr ściegu	Natężenie prądu, [A]	Napięcie łuku, [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Szybkość spawania, [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła, [kJ/mm]
1	81÷82	24÷29	= (+)	13	0,72÷0,88
2	88÷89	26÷30	= (+)	21	0,52÷0,61
3–n	88÷89	26÷30	= (+)	25	0,44÷0,51

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Widok spoiny wykonanej metodą 111: a) od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym, b) od strony grani

Fig. 6. View of the weld made using the 111 method: a) from the face side of the weld after penetrant testing, b) from the root side

Źródło: opracowanie własne

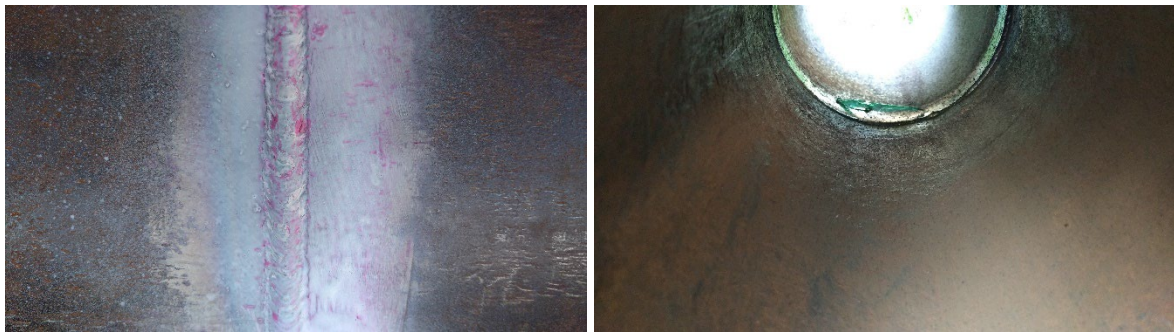
Trzeci zestaw próbek wykonano metodą 135, spawając z dołu do góry w pozycji PH. Jako materiał dodatkowy do spawania zastosowano drut lity G4Si1 wg PN-EN ISO 14341-A o średnicy \varnothing 1,0 mm [17]. Zużycie gazu osłonowego M21 wg PN-EN ISO 14175 wynosiło 14÷16 (l/min) [15]. Parametry spawania przedstawiono w tabeli 3. Rysunki 7a i 7b przedstawiają widok lica spoiny po badaniu penetracyjnym oraz grani.

Tabela 3

Parametry spawania dla trzeciego zestawu próbek (135 pozycja PH)

Nr ściegu	Natężenie prądu, [A]	Napięcie łuku, [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Szybkość spawania, [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła, [kJ/mm]
1	88÷103	16,0÷16,5	= (+)	22	0,31÷0,37
2	137÷142	18,9÷19,1	= (+)	24	0,52÷0,54
3-n	144÷158	18,8÷19,3	= (+)	22	0,59÷0,67

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Widok spoiny wykonanej metodą 135, spawanie z dołu do góry w pozycji PH: a) od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym, b) od strony grani

Fig. 7. View of the weld made with the method 135, welding from bottom to top in the PH position: a) from the face side of the weld after penetrant testing, b) from the root side

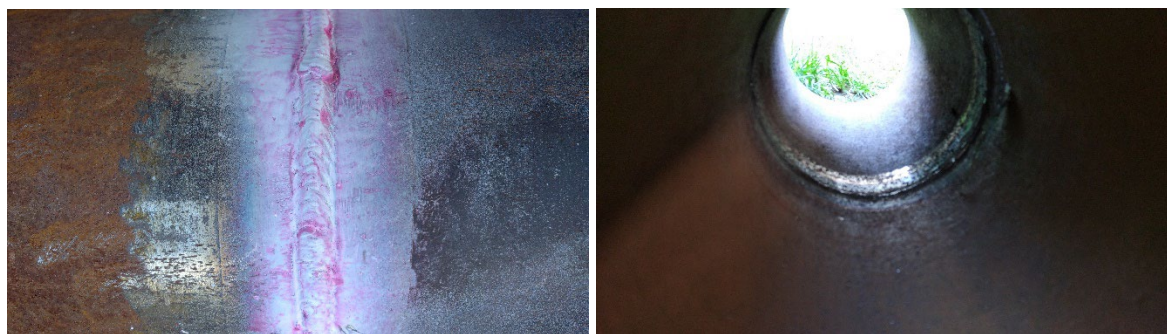
Źródło: opracowanie własne

Czwarty zestaw próbek został wykonany również metodą 135, z tym że pierwszy ścieg zrealizowano w pozycji PJ z góry na dół, a kolejne ściegi standardowo z dołu do góry w pozycji PH. Podobnie jak w dla trzeciego zestawu próbek jako materiał dodatkowy do spawania zastosowano drut lity G4Si1 wg EN ISO 14341-A o średnicy 1,0 mm, a zużycie gazu osłonowego M21 wg EN ISO 14175 wynosiło 14÷16 (l/min) [15, 17]. Parametry spawania przedstawiono w tabeli 4. Na rysunku 8a i 8b przedstawiono widok lica spoiny po badaniu penetracyjnym oraz grani.

Parametry spawania dla czwartego zestawu próbek (135 pozycja PJ+PH)

Nr ściegu	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Szybkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	88÷110	15,3÷16,3	= (+)	27	0,24÷0,32
2	140÷158	19,0÷19,3	= (+)	22	0,58÷0,67
3-n	144÷158	18,8÷19,3	= (+)	22	0,59÷0,67

Źródło: opracowanie własne



Rys. 8. Widok spoiny wykonanej metodą 135, spawanie z góry na dół w pozycji PJ: a) od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym, b) od strony grani

Fig. 8. View of the weld made with the method 135, welding from top to bottom in the PJ: a) from the face side of the weld after penetrant testing, b) from the root side

Źródło: opracowanie własne

Dla pierwszego zestawu próbek czas nagrzewania do temp. Max. mieścił się w granicach 13,5÷24,9 s, czas chłodzenia do 110°C wynosił od 2 min 37 s do 6 min 10 s. Temperatura maksymalna mieściła się w zakresie od 803°C do powyżej 962°C.

Dla drugiego zestawu próbek czas nagrzewania do temp. Max. mieścił się w granicach 1 min 33 s ÷ 4 min 15 s, czas chłodzenia do 110°C mieścił się w zakresie od 6 min 1 s do 7 min 25 s. Podczas spawania ze względu na przechodzenie materiału podstawowego w fazę ciekłą dochodziło do uszkodzania termopar w zakresie około 75%. Temperatura maksymalna mieściła się w przedziale od 1221°C do powyżej 1354°C.

Dla trzeciego zestawu próbek czas nagrzewania do temp. max mieścił się w granicach 62,7÷69,6 s, czas chłodzenia do 110°C wynosił od 7 min 57 s do 11 min 30 s. Podczas spawania ze względu na przechodzenie materiału podstawowego w fazę ciekłą dochodziło do uszkodzania termopar w zakresie około 50%. Temperatura maksymalna mieściła się w przedziale od 1220°C do powyżej 1354°C.

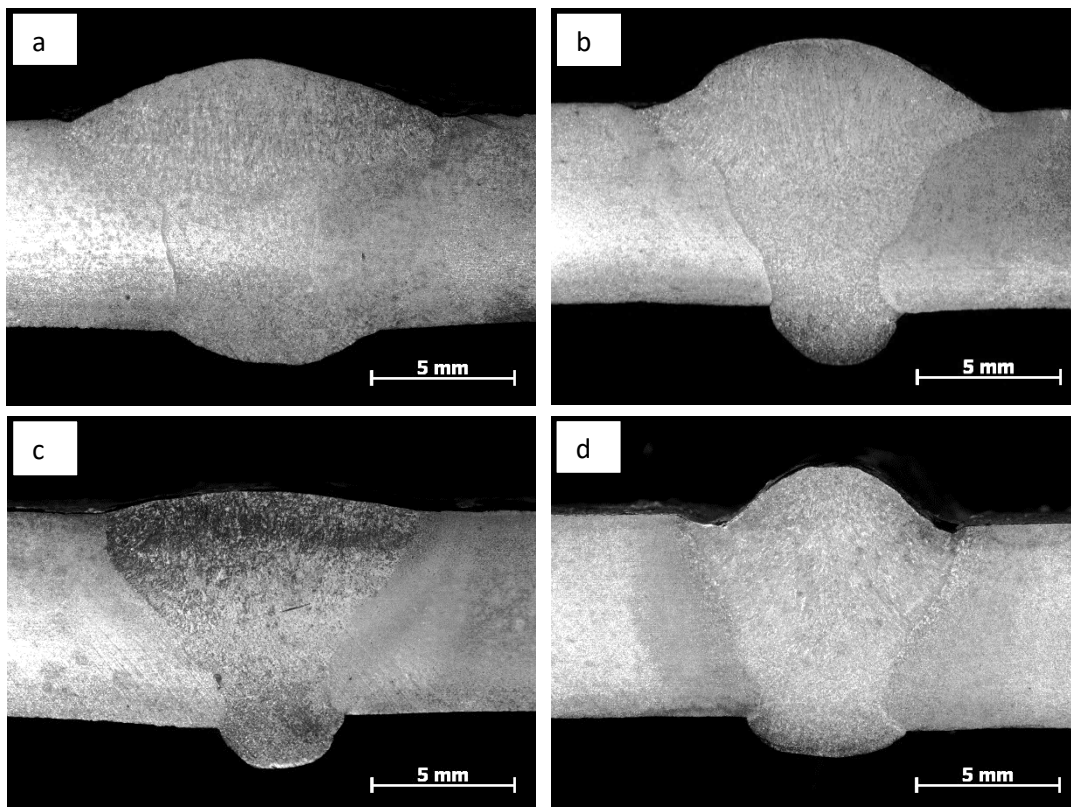
Dla czwartego zestawu próbek czas nagrzewania do temp. Max. mieścił się w granicach $3,3 \pm 30$ s, czas chłodzenia do 110°C wynosił od 2 min 32 s do 3 min 36 s. Temperatura maksymalna mieściła się w zakresie od 910°C do powyżej 1290°C .

Ze względu na ograniczenia termopar i urządzenia wyższe temperatury niż 1354°C nie zostały zarejestrowane.

Przeprowadzono badania wizualne, penetracyjne, magnetyczno-proszkowe oraz ultradźwiękowe złączy spawanych, złącza spełniały poziom jakości B zgodnie z PN-EN ISO 5817 [18].

6. Zgłady metalograficzne

Dla każdego zestawu próbek wykonano zgłady metalograficzne do badań makroskopowych i mikroskopowych, zgodnie z PN-EN ISO 17639 [19]. Próbki wytrawiono w 4% nitalu. Obserwacje zostały przeprowadzone na mikroskopie świetlnym stereoskopowym SteREO Discovery firmy Zeiss, zastosowano powiększenie 8x. Na rysunku 9 przedstawiono zgłady pierwszego, drugiego, trzeciego i czwartego zestawu badanych próbek.



Rys. 9. Widok makrostruktury, 4% nital, pow. 8x: a) pierwszy, b) drugi, c) trzeci, d) czwarty zestaw próbek

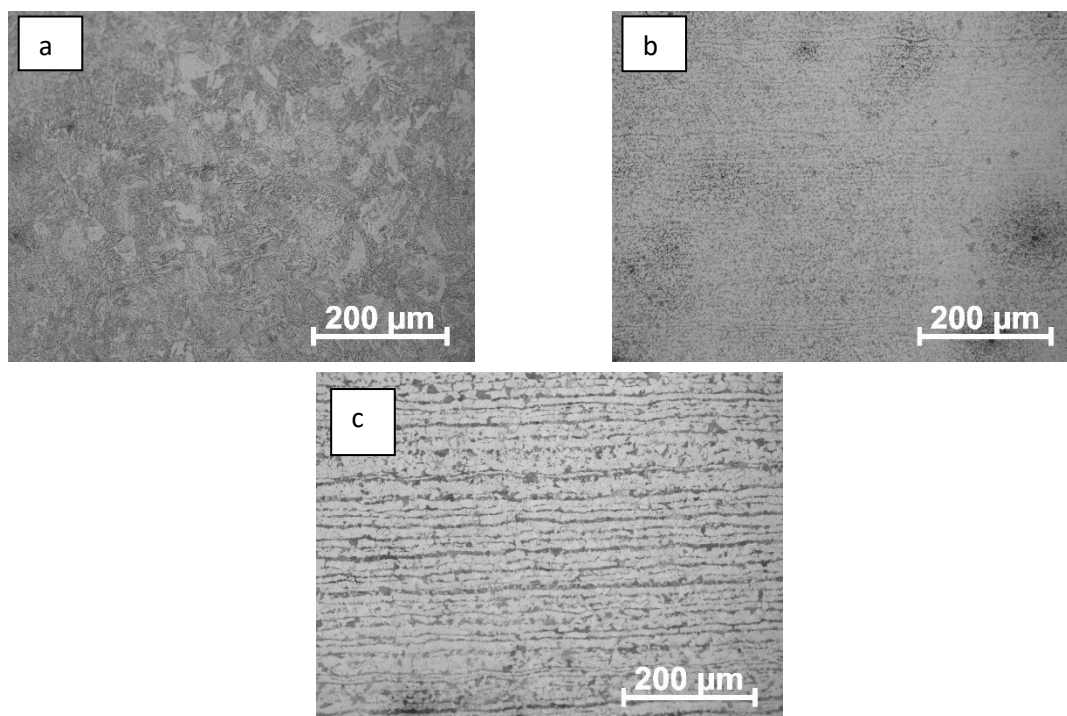
Fig. 9. Macrostructure view, 4% nital, 8x magn.: a) first, b) second, c) third, d) fourth set of samples

Źródło: opracowanie własne

Opierając się na normach PN-EN ISO 5817 i PN-EN ISO 6520-1, dokonano oceny jakości wykonanych złączy spawanych. Każdy z zestawów próbek spełniał wymagany poziom jakości B wg PN-EN ISO 5817 [18, 20].

Przedstawiono obserwacje mikrostruktur na metalograficznym mikroskopie świetlnym Axio Observer firmy Zeiss przy dwóch powiększeniach: 200x i 500x.

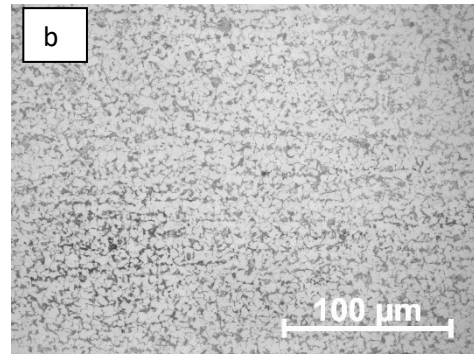
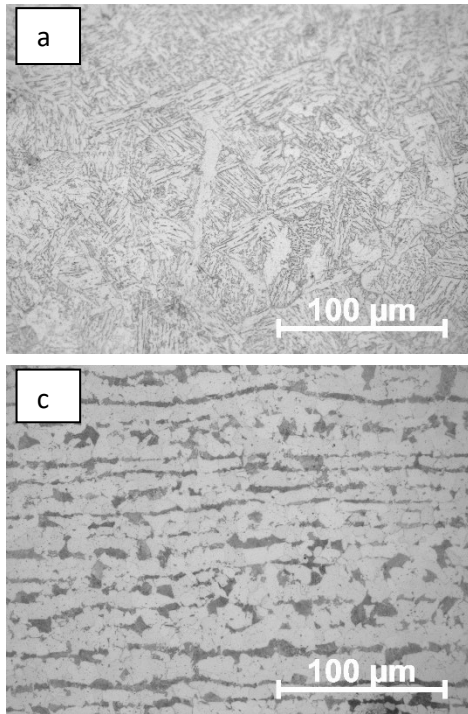
Na rysunku 10 przedstawiono mikrostrukturę pierwszego zestawu badanych próbek przy powiększeniu 200x, (a) dla spoiny, (b) strefy wpływu ciepła (SWC) i (c) materiału rodzimego (MR). Kolejny rysunek ukazuje mikrostrukturę przy powiększeniu 500x.



Rys. 10. Widok mikrostruktury spoiny pierwszego zestawu próbek, 4% nital, 200x: a) spoina, b) SWC, c) MR

Fig. 10. View of the weld microstructure of the first set of samples, 4% nital, 200x: a) weld, b) HAZ, c) base material

Źródło: opracowanie własne



Rys. 11. Widok mikrostruktury spoiny pierwszego zestawu próbek, 4% nital, 500x:

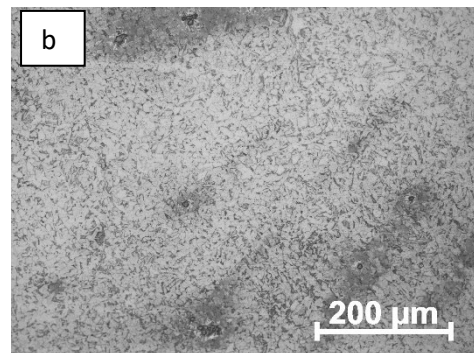
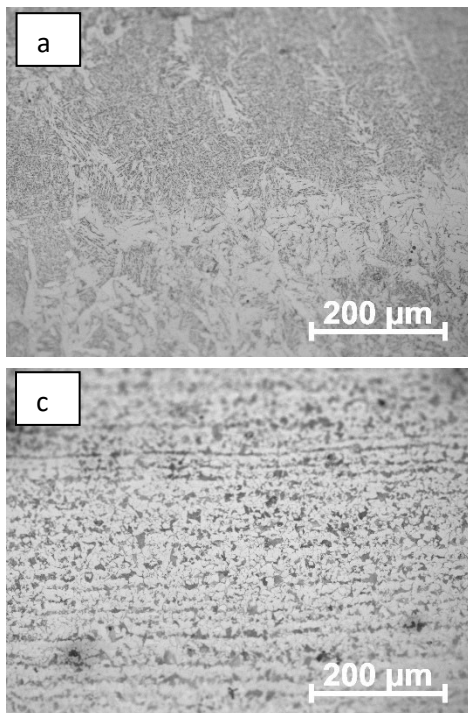
a) spoina, b) SWC, c) MR

Fig. 11. View of the weld microstructure of the first set of samples, 4% nital, 500x:

a) weld, b) HAZ, c) base material

Źródło: opracowanie własne

Podobnie jak dla pierwszego zestawu próbek na rysunkach 12 i 13 przedstawiono widoki mikrostruktur dla drugiego zestawu próbek przy powiększeniu 200x i 500x dla spoiny, strefy wpływu ciepła i materiału rodzimego.



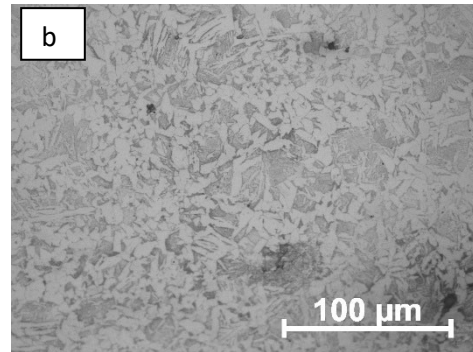
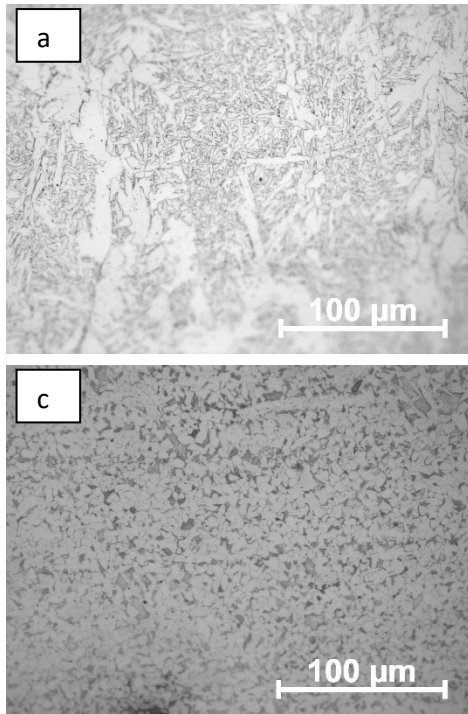
Rys. 12. Widok mikrostruktury spoiny drugiego zestawu próbek, 4% nital, 200x:

a) spoina, b) SWC, c) MR

Fig. 12. View of the weld microstructure of the second set of samples, 4% nital, 200x:

a) weld, b) HAZ, c) base material

Źródło: opracowanie własne



Rys. 13. Widok mikrostruktury spoiny drugiego zestawu próbek, 4% nital, 500x:

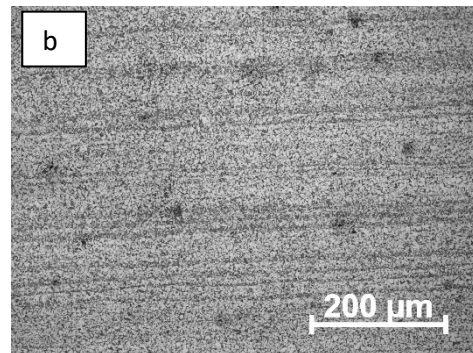
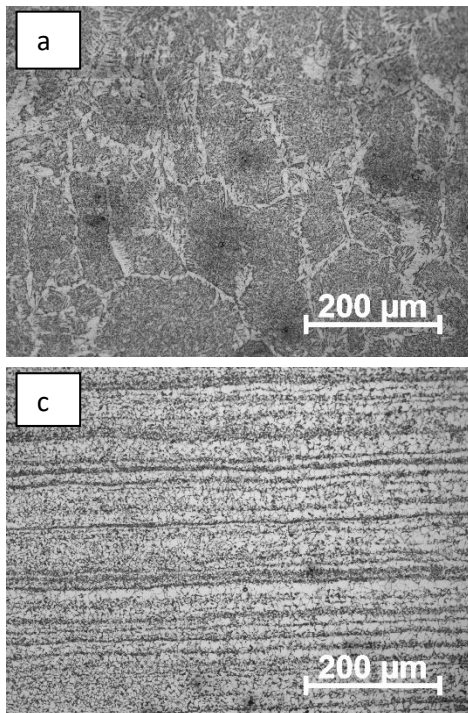
a) spoina, b) SWC, c) MR

Fig. 13. View of the weld microstructure of the second set of samples, 4% nital, 500x:

a) weld, b) HAZ, c) base material

Źródło: opracowanie własne

Dla trzeciego zestawu próbek widoki mikrostruktur przy powiększeniu 200x i 500x dla spoiny, strefy wpływu ciepła i materiału rodzimego przedstawiono na rysunkach 14 i 15.



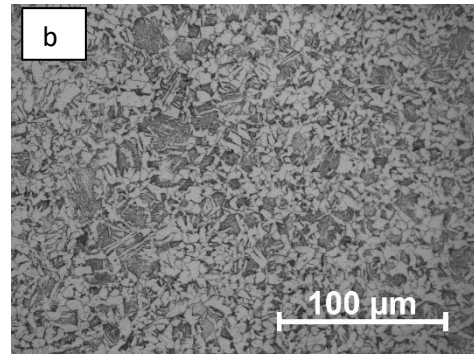
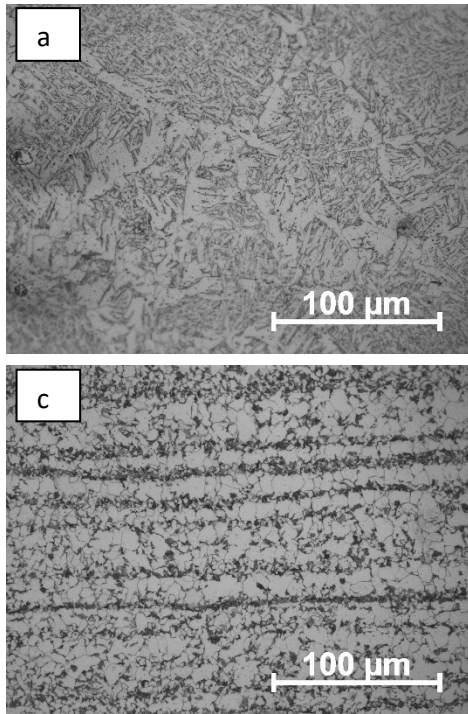
Rys. 14. Widok mikrostruktury spoiny trzeciego zestawu próbek, 4% nital, 200x:

a) spoina, b) SWC, c) MR

Fig. 14. View of the weld microstructure of the third set of samples, 4% nital, 200x:

a) weld, b) HAZ, c) base material

Źródło: opracowanie własne



Rys. 15. Widok mikrostruktury spoiny trzeciego zestawu próbek, 4% nital, 500x:

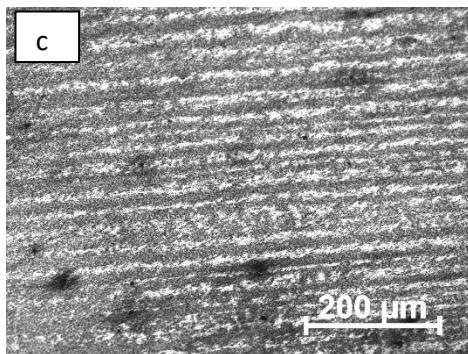
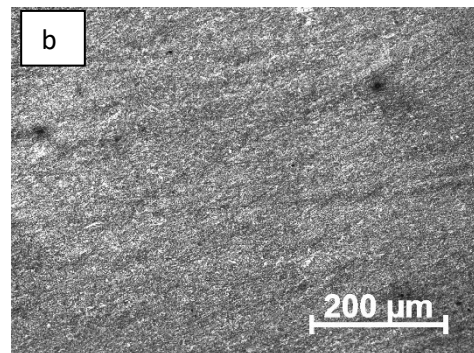
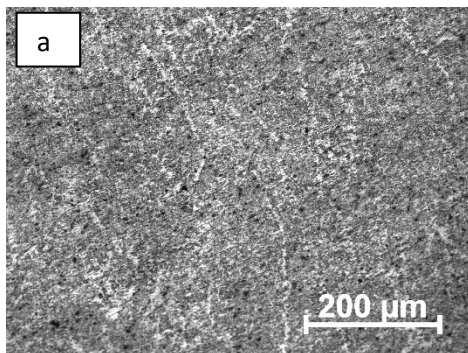
a) spoina, b) SWC, c) MR

Fig. 15. View of the weld microstructure of the third set of samples, 4% nital, 500x:

a) weld, b) HAZ, c) base material

Źródło: opracowanie własne

Dla czwartego zestawu próbek widoki mikrostruktur przy powiększeniu 200x dla spoiny, strefy wpływu ciepła i materiału rodzimego przedstawiono na rysunku 16, natomiast rys. 17 przedstawia powiększenie 500x.



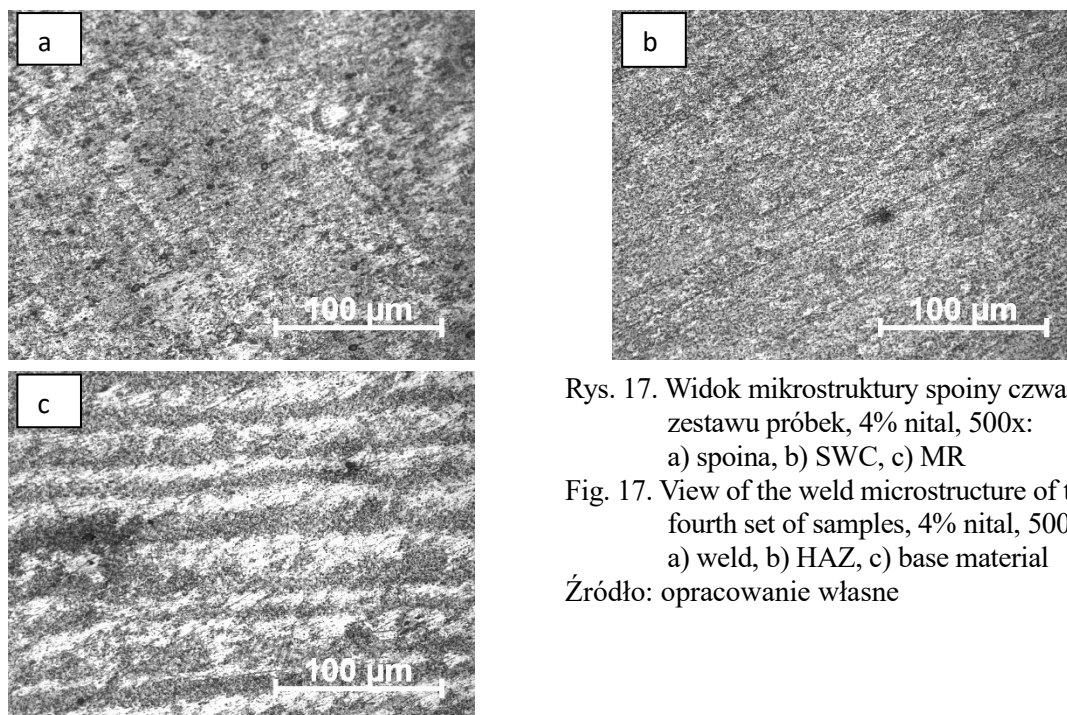
Rys. 16. Widok mikrostruktury spoiny czwartego zestawu próbek, 4% nital, 200x:

a) spoina, b) SWC, c) MR

Fig. 16. View of the weld microstructure of the fourth set of samples, 4% nital, 200x:

a) weld, b) HAZ, c) base material

Źródło: opracowanie własne



Rys. 17. Widok mikrostruktury spoiny czwartego zestawu próbek, 4% nital, 500x:

a) spoina, b) SWC, c) MR

Fig. 17. View of the weld microstructure of the fourth set of samples, 4% nital, 500x:

a) weld, b) HAZ, c) base material

Źródło: opracowanie własne

Materiał rodzimy we wszystkich badanych próbkach jest taki sam i wykazuje pasmową strukturę ferrytyczno-perlityczną, natomiast w SWC dla pierwszego zestawu próbek występuje mikrostruktura w obszarze normalizowania (powyżej temperatury A3), widoczna jest struktura ferrytyczno-perlityczna z równomiernie rozłożonymi ziarnami w miarę z zachowaną pasmowością. Drugi i trzeci zestaw badanych próbek również przedstawia strukturę ferrytyczno-perlityczną bez zachowania pasmowości. Całkowicie inaczej wygląda próbka zestawu czwartego – mikrostruktura jest przegrzana. Występuje gruboziarnista struktura byłego austenitu z zarysowanymi granicami ziarn i wewnątrz struktura ferrytu płytkowego – struktura Widmanstättena. W spoinie we wszystkich przypadkach widoczna jest struktura grubokrystaliczna z ułożonymi krystalitami w kierunku prostopadłym do linii wtopienia przy materiale rodzimym, składającymi się z podziaren ferrytu płytkowego – struktura Widmanstättena.

7. Wnioski

Przeprowadzono badania technologii spawania czterech zestawów próbek dla trzech metod spawania łukowego: 111, 141 oraz 135, dla 135 w dwóch różnych pozycjach spawania ścięgu graniowego. Dobrano optymalne parametry spawania oraz sposób kontroli temperatury podczas spawania. Przeprowadzono pomiary temperatury nagrzewania materiału od strony grani spoin.

Z analizy pomiarów temperatury podczas spawania wynika, że najbardziej optymalne wyniki osiągnięto dla pierwszego zestawu próbek, gdzie temperatura maksymalna osiągała najniższe wartości oraz występowały najkrótsze czasy nagrzewania i chłodzenia podczas spawania.

Przeprowadzono badania wizualne, penetracyjne, magnetyczno-proszkowe oraz ultradźwiękowe wykonanych złączy spawanych, które spełniały poziom jakości B zgodnie z PN-EN ISO 5817.

Złącza spawane wykazują prawidłową strukturę po spawaniu.

Gdy weźmie się pod uwagę powyższą analizę, przy uwzględnieniu wymagań uzyskania poziomu jakości B według PN-EN ISO 5817, osiągnięcia jak najniższych temperatur podczas spawania oraz jak najkrótszego czasu występowania wysokich temperatur powyżej 120°C, pierwszy zestaw próbek jest najbliższy rozwiązaniu optymalnemu. Pomimo faktu najlepszych osiągnięć wyników dla pierwszego zestawu próbek wymagana jest dalsza optymalizacja.

Bibliografia

1. Wyględacz B., Kik T.: Termoelektryczne i termograficzne pomiary wysokotemperaturowych cykli cieplnych, *Spajanie Mater. Konstr.*, 2019, nr 4, s. 30-33.
2. Jamrozik W., Górka J., Kik T.: Temperature-Based Prediction of Joint Hardness in TIG Welding of Inconel 600, 625 and 718 Nickel Superalloys. *Materials*, 2021, 14, 442.
3. Topór S., Topolska S.: Technologia spawania rur stalowych z wykładkami kompozytowymi na bazie poliuretanu, [w:] Górka J.: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Polska Akademia Nauk, Gliwice 2022, s. 384-392.
4. Stanisław D., Machniewicz T., Parzych S., Jeż G., Dvorkin L., Hebda M.: Microstructure and Mechanical Properties of Joints Depending on the Process Used. *Materials*, 2022, 15, 5171.
5. Henzler W., Grzywna E., Sawa M., Kiszczak-Grądziel J., Szala M.: Wpływ parametrów spawania na właściwości złączy spawanych metodą TIG, [w:] Górka J.: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Polska Akademia Nauk, Gliwice 2022, s. 432-442.
6. Írsel G.: Study of the microstructure and mechanical property relationships of shielded metal arc and TIG welded S235JR steel joints. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 830.
7. Topór S.: Wpływ sposobu spawania na rozkład temperatur spawanych rur stalowych z wykładkami kompozytowymi [w:] Gwiazda A.: Interdyscyplinarne badania młodych naukowców. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2022, s. 286-310.
8. www.takoni.com.pl [dostęp: 4.04.2022].

9. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 4063:2011, Spawanie i procesy pokrewne – Nazwy i numery procesów.
10. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN 10216-3:2014-02, Rury stalowe bez szwu do zastosowań ciśnieniowych – Warunki techniczne dostawy – Część 3: Rury ze stali stopowych drobnoziarnistych.
11. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 9692-1:2014-02, Spawanie i procesy pokrewne – Rodzaje przygotowania złączy – Część 1: Ręczne spawanie łukowe, spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazów, spawanie gazowe, spawanie metodą TIG i spawanie wiązką stali.
12. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN 60584-1:2014-04, Termoelementy – Część 1: Specyfikacje i tolerancje EMF.
13. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 21952-A:2012, Materiały dodatkowe do spawania – Druty elektrodowe, druty, pręty i stopiwa do spawania łukowego w osłonie gazu stali odpornych na pełzanie – Klasyfikacja.
14. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 6848:2015-10, Spawanie i cięcie łukowe – Elektrody wolframowe nietopliwe – Klasyfikacja.
15. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 14175:2009, Materiały dodatkowe do spawania – Gazy i mieszaniny gazów do spawania i procesów pokrewnych.
16. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 2560:2021-03, Materiały dodatkowe do spawania – Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego stali niestopowych i drobnoziarnistych – Klasyfikacja.
17. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 14341-A:2021-03, Materiały dodatkowe do spawania – Druty elektrodowe i stopiwo do spawania łukowego elektrodą metalową w osłonie gazu stali niestopowych i drobnoziarnistych – Klasyfikacja.
18. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 5817:2014-05, Spawanie – Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) – Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
19. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 17639:2022-07, Badania niszczące spawanych złączy metali – Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych.
20. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 6520-1:2009 Spawanie i procesy pokrewne – Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach – Część 1: Spawanie.
21. Polski Komitet Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 9015-1:2011, Badania niszczące złączy spawanych metali – Badanie twardości – Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo.

WPLYW METODY SPAWANIA NA ROZKLAD TEMPERATUR SPAWANYCH RUR STALOWYCH Z WYKLADKAMI KOMPOZYTOWYMI

Streszczenie

W artykule przedstawiono i porównano ze sobą wyniki pomiarów dokonanych podczas badań spawania rur stalowych, które docelowo będą pokryte od wewnętrznej strony rur wykładkami kompozytowymi. Porównano ze sobą różne metody spawania, stosując również różne techniki spawania. Przedstawiono wyniki pomiarów cykli cieplnych podczas spawania, wyniki badań wizualnych, penetracyjnych, magnetyczno-proszkowych, ultradźwiękowych, makroskopowych i mikroskopowych. W podsumowaniu określono, które rozwiązania spełniają kryteria jakościowe wykonania spoin oraz są najbliższe pod względem wyników rozwiązaniu optymalnemu.

Słowa kluczowe: rozkład temperatur podczas spawania, wpływ metody spawania na rozkład temperatur, technologia spawania rur z wykładkami, spawanie rur stalowych z wykładkami

INFLUENCE OF THE WELDING METHOD ON THE TEMPERATURE DISTRIBUTION OF WELDED STEEL PIPES WITH COMPOSITE LINING

Abstract

In this article are presented and compared results of measurements taken during welding tests of steel pipes, which the inner side, as a target, will be coated with composite liners. Different welding methods were compared with each other, also using different welding techniques. The results of measurements of thermal cycles during welding, the results of visual, penetrant, magnetic, ultrasonic, macroscopic and microscopic tests are presented. In conclusion, it is determined which solutions meet the quality criteria for weld fabrication and which are the closest to the parameters of the optimal solution.

Keywords: temperature distribution during welding, influence of welding method on temperature distribution, welding technology for lined tubes, welding of lined steel tubes

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice
tel. (32) 237-13-81, faks (32) 237-15-02
www.wydawnictwopolitechniki.pl

UIW 48600

Sprzedaż i Marketing
tel. (32) 237-18-48
wydawnictwo_mark@polsl.pl

Sprawy wydawnicze
tel. (32) 237-13-81
wydawnictwo@polsl.pl

Ark. wyd. 33

e-wydanie
Monografia 987



MONOGRAFIA 987

ISBN 978-83-7880-905-0

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 5
tel. (32) 237-13-81, faks (32) 237-15-02
www.wydawnictwopolitechniki.pl
Dział Sprzedaży i Reklamy
tel. (32) 237-18-48
e-mail: wydawnictwo_mark@polsl.pl
<http://www.polsl.pl/Jednostki/RJO2-WPS>